

---

# IASS DISCUSSION PAPER

Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Potsdam, Februar 2022

## Monitoring der globalen Wasserstoff- wirtschaft

**Konzeptentwurf und Datenquellen**

Rainer Quitzow, Joschka Jahn, Adela Marian, Knut Blind,  
Lorenzo Cremonese, Grace Mbungu, Felix Neuner, Sonja  
Thielges, Martin Wietschel

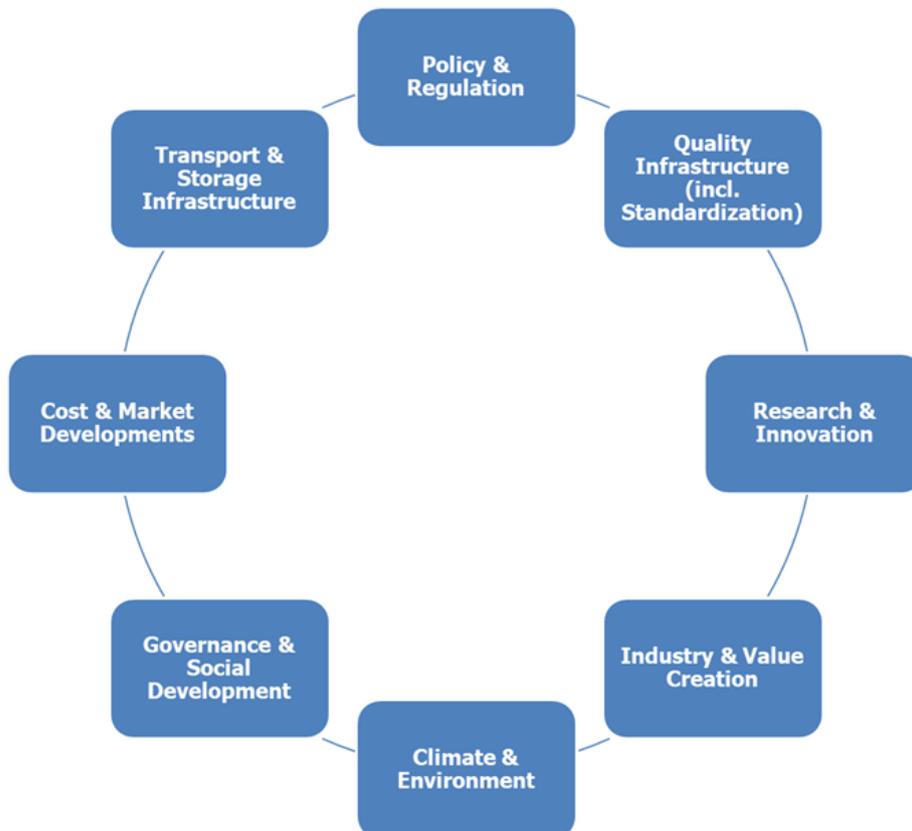


# Executive Summary (English)

This report presents a framework for the systematic monitoring of the global hydrogen economy. It suggests data sources and indicators to systematically survey the most important trends and developments of a future global hydrogen economy. Monitoring based on this framework could provide an important knowledge base for the continuous review of policy measures related to the German and European hydrogen policy.

## Thematic areas for monitoring the global hydrogen economy

The framework is divided into eight thematic areas (see figure), described in Section A of the report. They provide a comprehensive framework for monitoring major developments in the global hydrogen economy, making it possible to evaluate related changes in Germany and Europe. The focus for this is production of climate-neutral and sustainable hydrogen, in particular hydrogen produced with electricity from renewable resources, or green hydrogen. The thematic area “Market Development” also considers various fields of hydrogen use. The remaining thematic areas do not consider usage technologies in detail, though in principle it would be possible to expand the framework to include them.



## Monitoring the thematic areas: Objectives, indicators and data sources

Section B of the report presents a detailed sub-framework for each of the eight thematic areas. Each sub-section first details the objective and the central issues for monitoring the respective thematic area; following this, the state of current knowledge is briefly reviewed and available data sources are identified. On this basis, a detailed monitoring framework is presented which includes indicators and corresponding data sources.

## Focus analyses: Economic competitiveness and technological sovereignty

To complement the eight thematic areas, the report and the proposed monitoring framework pays specific attention to the issues of economic competitiveness and technological sovereignty in the hydrogen economy. As these issues are affected by the interplay of various developments within the eight thematic areas, it would not be appropriate to treat them as additional, isolated items. For this reason, Section C of this report examines economic competitiveness and technological sovereignty as cross-cutting issue areas, drawing on selected indicators from the eight thematic areas.

## Recommendations for the implementation of the monitoring framework

Finally, Section D of the report outlines recommendations for the implementation of the monitoring framework and identifies priorities for additional data collection to close the most critical gaps in existing knowledge.

### Build capacities and networks

To successfully implement the monitoring framework, necessary capacities must be created both for the regular preparation of monitoring reports and the collection of additional data in the individual thematic areas. Cooperation with the Fuel Cells and Hydrogen Observatory (FCHO) and the International Energy Agency (IEA) could contribute to making optimal use of existing data sources and ensuring complementarity with ongoing monitoring processes at the international level. Likewise, collaboration with existing research initiatives in Germany should be established. Examples include three collaborative projects to determine potentials for the production of green hydrogen, which are being carried out with the support of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV).

### Establish monitoring as part of Energy Partnerships and Dialogues

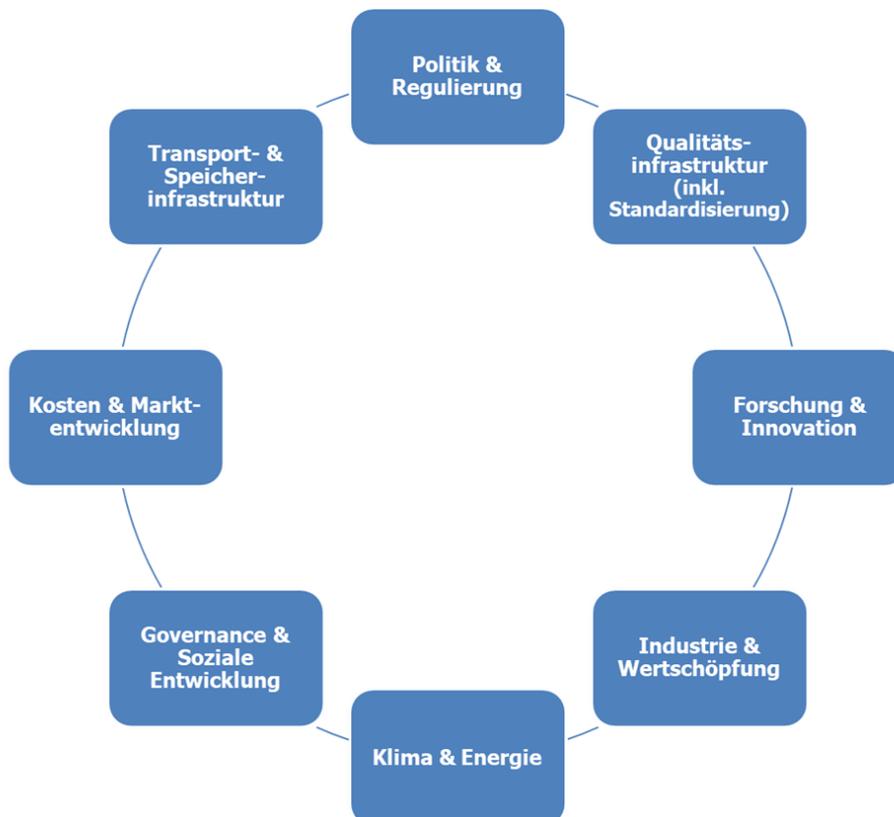
The German government's Energy Partnerships and the presence of implementing organizations in important pioneer countries and potential hydrogen-producing countries could provide a basis for collecting country-specific data as part of the monitoring framework. In particular, the Energy Partnership network holds potential for collecting current data in areas of the hydrogen sector that are expected to develop rapidly in the coming years, making it critical to obtain new data on a regular basis. This would allow the reflection of these trends in the further development of European and German hydrogen policy. Yet, to be able to use monitoring data for policy development, systematic data collection and processing are needed. The monitoring framework presented in this study establishes the basis for elaborating a taxonomy for this purpose

# Zusammenfassung

Im folgenden Bericht wird ein **Konzept für ein systematisches Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft** vorgestellt. Der Bericht stellt Datenquellen und Indikatoren zur systematischen Erfassung der wichtigsten Trends und Entwicklungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft vor. Ein entsprechendes Monitoring könnte einen wichtigen Beitrag zur kontinuierlichen Überprüfung von Politikmaßnahmen im Rahmen der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik leisten.

## Themenfelder für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft

Das Monitoringkonzept gliedert sich in **acht Themenfelder** (siehe Abbildung), die in Teil A des Berichtes vorgestellt werden. Diese geben einen umfassenden Überblick über wesentliche Entwicklungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft und ermöglichen es Veränderungen in Deutschland und Europa vor diesem Hintergrund zu bewerten. Dabei liegt der **Fokus auf dem Bereich der Herstellung von klimaneutralem und nachhaltigem Wasserstoff**, mit besonderem Augenmerk auf strombasiertem Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen (sogenanntem grünen Wasserstoff). Im Bereich der Marktentwicklungen werden auch die verschiedenen Anwendungsfelder erfasst. Im Rahmen der sonstigen Themenfelder ist eine detaillierte Erfassung von Anwendungstechnologien nicht vorgesehen. Es ist aber grundsätzlich möglich, das Konzept bei Bedarf entsprechend zu erweitern.



## Monitoring der Themenfelder: Zielsetzungen, Indikatoren und Datenquellen

Teil B des Berichtes stellt für jedes der acht Themenfelder ein detailliertes Teilkonzept vor. In den jeweiligen Teilabschnitten werden zunächst die Zielsetzung und die zentralen Fragestellungen für das Monitoring des Themenfeldes sowie der aktuelle Wissensstand und die verfügbaren Datenquellen dargestellt. Darauf basierend wird ein **detailliertes Monitoringkonzept, einschließlich Indikatoren und möglicher Datenquellen**, definiert.

## Fokusanalysen: Wettbewerbsfähigkeit sowie wirtschaftliche und technologische Souveränität

In Ergänzung zu den acht Themenfeldern legt dieser Bericht und das vorgeschlagene Monitoringkonzept ein besonderes Augenmerk auf Fragen der **Wettbewerbsfähigkeit und der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität** im Rahmen der Wasserstoffwirtschaft. Es ist allerdings nicht sinnvoll diese Aspekte als zusätzliche, isolierte Themenfelder zu behandeln. Vielmehr sind sie die Folge des Zusammenspiels verschiedener Entwicklungen innerhalb der acht Themenfelder. In dem Sinne werden Fragen der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit und der Technologiesouveränität, aufbauend auf ausgewählten Indikatoren der acht Themenfelder, in Teil C dieses Berichtes gesondert beleuchtet.

## Schlussfolgerungen für die Umsetzung des Monitoringkonzeptes

Schließlich stellt Teil D des Berichtes Schlussfolgerungen für die Umsetzung des Monitoringkonzeptes vor und identifiziert prioritäre Vorhaben zur Schließung wichtiger Wissenslücken. Für die Umsetzung des Konzeptes werden folgende Punkte hervorgehoben:

### Kapazitäten und Netzwerke aufbauen

Für die Umsetzung des Monitoringkonzeptes müssen notwendige Kapazitäten für die Erstellung der Monitoringberichte sowie zur Erhebung zusätzlicher Daten in einzelnen Themenfeldern geschaffen werden. Um eine optimale Nutzung vorhandener Datenquellen bzw. um die Komplementarität zu vorhandenen Monitoringprozessen auf internationaler Ebene sicherzustellen, wäre eine Zusammenarbeit mit dem Fuel Cells and Hydrogen Observatory (FCHO) sowie der Internationalen Energieagentur (IEA) sinnvoll. Ebenso sollten Kooperationen mit vorhandenen Initiativen in Deutschland aufgebaut werden, darunter drei Verbundprojekte zu Ermittlung von Potenzialen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff, die mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) bzw. des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) durchgeführt werden.

### Monitoring im Rahmen der Energiepartnerschaften und -dialoge etablieren

Die Energiepartnerschaften der Bundesregierung und die damit verbundene Präsenz der beauftragten Durchführungsorganisationen in wichtigen Vorreiterländern und potenziellen Produktionsländern für Wasserstoff bieten eine mögliche Basis für die Erhebung länderspezifischer Daten im Rahmen des Monitorings. Insbesondere in Bereichen, in denen zu erwarten ist, dass sich der Wasserstoffsektor in den nächsten Jahren besonders dynamisch entwickeln wird, bietet das Netzwerk der Energiepartnerschaften ein großes Potenzial, um sehr zeitnah Trends zu erfassen, die für die Weiterentwicklung der europäischen und deutschen Wasserstoffpolitik von großer Bedeutung sind. Um Monitoringdaten für die Politikentwicklung nutzen zu können, ist allerdings eine systematische Erhebung und Aufbereitung der Daten erforderlich. Das in dieser Studie vorgestellte Monitoringkonzept bietet die Grundlage für die Ausarbeitung einer entsprechenden Systematik.

## **Prioritäre Vorhaben für die Schließung von Wissenslücken**

Wichtiger erster Schritt für das Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Wasserstoffindustrie ist die Durchführung einer Analyse der Potenziale verschiedener Technologien und Komponenten für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen deutschen bzw. europäischen Wasserstoffindustrie. Auf der Grundlage können sowohl Fortschritte in diesem Feld gemessen als auch politische Interventionen weiterentwickelt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen bzw. europäischen Wasserstoffindustrie zu fördern und um langfristige Potenziale für Wertschöpfung und Beschäftigung zu erschließen. Eine solche Potenzialanalyse sollte mit einer Ersterhebung der globalen Unternehmens- und Innovationslandschaft im Wasserstoffsektor beginnen. Damit könnte eine Basis für das zukünftige Monitoring sowie für eine weiterführende Analyse von Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzialen gelegt werden.

### **Danksagung**

Diese Studie wurde durch das Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) und dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) mit einer Finanzierung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK) durchgeführt.

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich bei den internationalen Expertinnen und Experten für Brennstoffzellen- und Wasserstoffwirtschaft, die im Rahmen fokussierter Interviews ihre Expertise eingebracht haben. Die Beiträge der Expertinnen und Experten waren eine wichtige zusätzliche Informationsquelle. Unser Dank gilt (in alphabetischer Reihenfolge): Dr. Laurent Antoni (Hydrogen Europe Research), Dr. José Miguel Bermudez Menendez (IEA), Dr. Luca Bertuccioli (E4Tech), Dr. Xavier Casals (IRENA), Werner Diwald (DWV), Jill Engel-Cox (NREL), Alexandru Floristean (Hydrogen Europe), Tim Heisterkamp (Linde, als Mitglied des Hydrogen Council), Marina Holgado (Hinicio, für das Hydrogen TCP der IEA), Dr. Ulrike Lehr (IRENA), Grzegorz Pawelec (Hydrogen Europe), Diana Raine (E4Tech), Mark Ruth (NREL) und Daryl Wilson (Hydrogen Council).

Schließlich bedankt sich die Autorinnen und Autoren für die Kommentierung und Begleitung der Studie bei Toni Glaser (BMWK) und dem Referat für bilaterale Energiezusammenarbeit des BMWK.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

## Teil A: Einführung und Überblick

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Einführung   | 14 |
| 2. | Themenfelder für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft       | 15 |
| 3. | Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftliche und technologische Souveränität | 17 |
| 4. | Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands                                  | 21 |

## Teil B: Das Monitoringkonzept

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Kosten- und Marktentwicklung                             | 24 |
| 2. | Transport- und Speicherinfrastruktur                     | 30 |
| 3. | Politik und Regulierung                                  | 34 |
| 4. | Qualitätsinfrastruktur (einschließlich Standardisierung) | 38 |
| 5. | Forschung und Innovation                                 | 42 |
| 6. | Industrie und Wertschöpfung                              | 46 |
| 7. | Klima und Umwelt   | 49 |
| 8. | Governance und soziale Entwicklung                       | 54 |

## Teil C: Fokusanalysen

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Wettbewerbsfähigkeit                            | 59 |
| 2. | Wirtschaftliche und technologische Souveränität | 61 |

## Teil D: Schlussfolgerungen

|   |    |
|---|----|
| 1. Umsetzung eines Monitoringprozesses                                    | 65 |
| 2. Potenzialanalyse zu Wettbewerbsfähigkeit, Wertschöpfung und Innovation | 66 |
| Literatur   | 67 |
| Zu den Autor*innen  | 70 |

---

# Abkürzungsverzeichnis

---

|                  |  |
|------------------|--|
| ALK              | Alkalische Elektrolyse, bzw. Brennstoffzelle   |
| BGR              | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe                                    |
| BMBF             | Bundesministerium für Bildung und Forschung  |
| BMUV             | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz |
| BMWK             | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz                                     |
| CCS              | CO <sub>2</sub> Abscheidung und Speicherung  |
| CCU              | CO <sub>2</sub> Abscheidung und Verwendung   |
| CFD              | Contracts for Difference   |
| CH <sub>4</sub>  | Synthetisches Methan   |
| DAkKS            | Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH  |
| DERA             | Deutsche Rohstoffagentur   |
| DWV              | Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.                             |
| EA               | European Co-operation for Accreditation  |
| EPA              | Environmental Protection Agency  |
| EUIPO            | Amt der Europäischen Union für geistiges Eigentum                                    |
| FCH JU           | Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking  |
| FCHEA            | Fuel Cells and Hydrogen Energy Association   |
| FCHO             | Fuel Cells and Hydrogen Observatory  |
| H <sub>2</sub> A | Hydrogen Analysis  |
| HS               | Harmonized System  |
| IAF              | International Accreditation Forum  |
| IASS             | Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung                                 |
| ICS              | International Classification of Standards  |
| IEA              | Internationale Energieagentur  |
| IEC              | Internationale Elektrotechnische Kommission  |
| IPHE             | International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy                 |
| ISI              | Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung                              |
| ISO              | Internationale Organisation für Normung  |
| KCDB             | Internationale Metrologiedatenbank   |
| LKW              | Lastkraftwagen   |
| LOHC             | Flüssiger organischer Wasserstoffträger  |
| NACE             | Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft       |
| NDC              | National festgelegte Beiträge  |
| NEP              | Netzentwicklungsplan   |
| NH <sub>3</sub>  | Ammoniak   |
| NOW              | Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie                  |
| NREL             | National Renewable Energy Laboratory   |
| OECD             | Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit                      |
| OIML             | Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen                            |
| PEM              | Protonen-Austausch-Membranen   |
| ppm              | Parts per Million  |
| PtX              | Power-to-X   |
| PV               | Photovoltaik   |
| REN21            | Renewable Energy Policy Network for the 21st Century                                 |
| RISE             | Regulatory Indicators for Sustainable Energy   |
| SDGs             | Globale Nachhaltigkeitsziele   |

|        |  |
|--------|--|
| SOEC   | Festoxid-Elektrolysezelle                        |
| SOFC   | Festoxid-Brennstoffzelle                         |
| STIP   | Science, Technology and Innovation Policy        |
| SWOT   | Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats |
| TCP    | Technology Cooperation Programme                 |
| UNFCCC | Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen     |
| WIPO   | Weltorganisation für geistiges Eigentum          |
| WTO    | Welthandelsorganisation                          |

---

# Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Themenfelder für das Monitoring einer globalen Wasserstoffwirtschaft  | 15 |
| Abbildung 2: Einflussfaktoren auf Wettbewerbsfähigkeit   | 19 |
| Tabelle 1: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Kosten- und Marktentwicklungen im Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor | 25 |
| Tabelle 2: Indikatoren für das Monitoring der Gestehungskosten von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte                       | 27 |
| Tabelle 3: Indikatoren für das Monitoring der globalen Nachfrage nach Wasserstoff  | 28 |
| Tabelle 4: Indikatoren für das Monitoring der globalen Produktionskapazitäten von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte        | 29 |
| Tabelle 5: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Wasserstoffinfrastruktur  | 32 |
| Tabelle 6: Indikatoren für das Monitoring der globalen Transportinfrastruktur für Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte         | 33 |
| Tabelle 7: Bestehende Datenquellen für das Monitoring der Politik und Regulierung  | 35 |
| Tabelle 8: Analysekategorien für das Monitoring von Politikzielen und -instrumenten  | 36 |
| Tabelle 9: Datenquellen für das Monitoring der Qualitätsinfrastruktur  | 39 |
| Tabelle 10: Indikatoren für das Monitoring der globalen Qualitätsinfrastruktur   | 40 |
| Tabelle 11: Datenquellen für das Monitoring der Qualitätsinfrastruktur   | 43 |
| Tabelle 12: Indikatoren für das Monitoring von Forschung und Innovation  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 13: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Industrie und Wertschöpfung   | 47 |
| Tabelle 14: Indikatoren für das Monitoring der Klima- und Umweltverträglichkeit der globalen Wasserstoffwirtschaft                        | 51 |
| Tabelle 15: Indikatoren für das Monitoring der Auswirkung der Wasserstoffproduktion auf die Reduzierung von CO2 Emissionen im Stromsektor | 53 |
| Tabelle 16: Indikatoren für das Monitoring von Governance und sozialer Entwicklung in der globalen Wasserstoffwirtschaft                  | 56 |
| Tabelle 17: Datenquellen für die Analyse der Kapazitäten des Innovationssystems und der Marktentwicklung                                  | 60 |
| Tabelle 18: Datenquellen für die Analyse eigener Kompetenzen und Ressourcen für technologische Souveränität                               | 62 |
| Tabelle 19: Datenquellen für die Analyse wirtschaftlicher und technologischer Abhängigkeit  | 62 |

# TEIL A: Einführung und Überblick

---

# 1. Einführung

---

Im folgenden Bericht wird ein Konzept für ein systematisches Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft vorgestellt. Ein entsprechendes Monitoring kann zur systematischen Erfassung der wichtigsten Trends und Entwicklungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft beitragen. Auf diese Weise kann die Entwicklung der deutschen und europäischen Wasserstoffwirtschaft im Kontext internationaler Veränderungen bewertet werden. Schließlich kann ein systematisches Monitoring zur Bewertung der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik herangezogen werden. Das hier vorgelegte Konzept definiert zu diesem Zweck entlang acht Themenfeldern Indikatoren und Datenquellen. Es identifiziert zudem Bereiche, in denen die Erhebung zusätzlicher Daten für ein systematisches Monitoring erforderlich wären. Auf diese Weise soll das Konzept wichtige Datenlücken aufzeigen und zur Entwicklung entsprechender Forschungsaktivitäten beitragen. Ebenso bietet es einen Überblick über bestehende Datenquellen.

Das in diesem Bericht skizzierte Monitoringkonzept adressiert unterschiedliche Dimensionen des Wasserstoffsektors und seiner Entwicklung. Besonderes Augenmerk liegt dabei allerdings auf Fragen der Wettbewerbsfähigkeit im Kontext einer entstehenden Wasserstoffwirtschaft. Die Schaffung einer unabhängigen Datenbasis ist für laufende Debatten zur förderpolitischen Maßnahmen im Wasserstoffsektor von besonderer Bedeutung. Sie bietet die Möglichkeit, förderpolitische Maßnahmen im Kontext internationaler Entwicklungen zu bewerten und die Potenziale, Kapazitäten und Fortschritte der heimischen Wirtschaft vor diesem Hintergrund systematisch zu überprüfen.

Teil A des Berichtes führt in das Monitoringkonzept ein. Es gibt einen Überblick über die acht Themenfelder, in die das Monitoringkonzept gegliedert ist, sowie zwei darauf aufbauende Fokusbereiche – Wettbewerbsfähigkeit und Technologiesouveränität. Darüber hinaus wird ein Ansatz für einen systematischen Monitoringprozess skizziert. Schließlich wird der Betrachtungsgegenstand des Berichtes und des darin vorgestellten Monitoringkonzeptes eingegrenzt.

Teil B stellt detaillierte Teilkonzepte für jedes der acht Themenfelder vor. In jedem Teilabschnitt werden die Zielsetzung und die zentralen Fragestellungen für das Monitoring des jeweiligen Themenfeldes sowie der aktuelle Wissensstand und verfügbare Datenquellen dargestellt. Darauf basierend wird ein detailliertes Monitoringkonzept, einschließlich Indikatoren und möglicher Datenquellen, definiert.

Teil C stellt darauf aufbauend einen Ansatz für das Monitoring der zwei Fokusbereiche, Wettbewerbsfähigkeit und Technologiesouveränität, vor. Dabei kommen jeweils Indikatoren aus mehreren der zuvor skizzierten Themenfeldern zum Einsatz, die zu diesem Zweck entsprechend zusammengestellt werden.

Teil D des Berichtes stellt abschließende Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen dar. Dies umfasst allgemeine Empfehlungen für den Aufbau eines Monitoringsystems sowie die Identifizierung von zentralen Prioritäten für den Aufbau einer unabhängigen Wissensbasis für die Überprüfung der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik.

## 2. Themenfelder für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft

Im folgenden Abschnitt werden die vorgeschlagenen Themenfelder für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft identifiziert. Ausgehend von den Zielen der Nationalen Wasserstoffstrategie werden acht Themenfelder (siehe Abbildung 1) und ihre Relevanz für das Monitoring kurz erläutert.

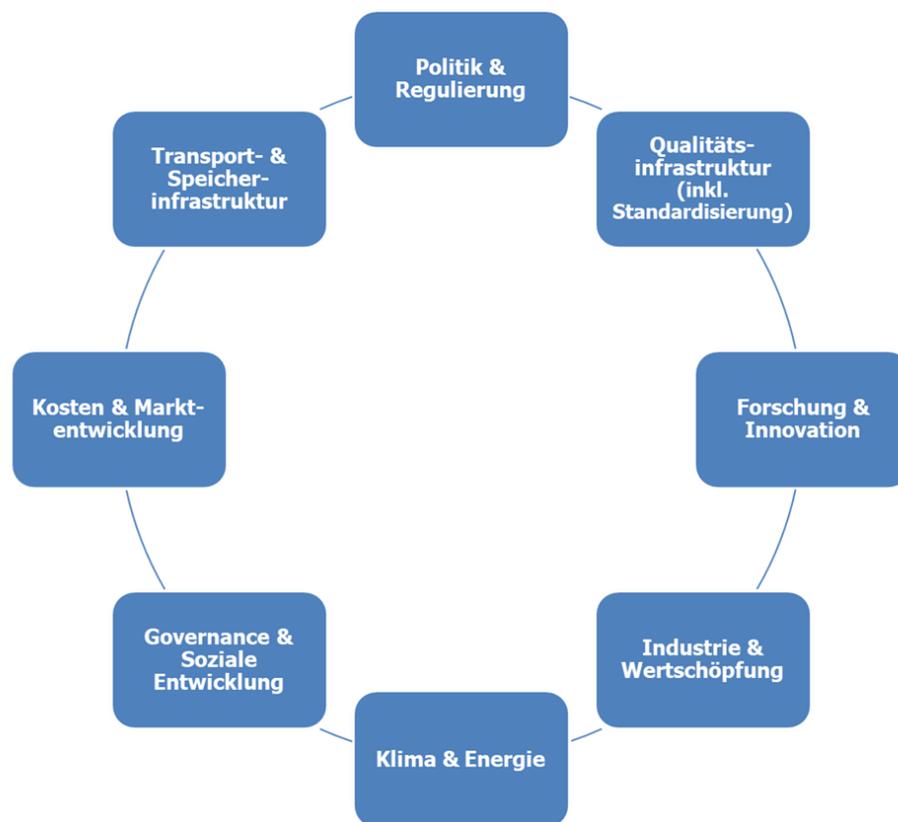


Abbildung 1: Themenfelder für das Monitoring einer globalen Wasserstoffwirtschaft

Die übergeordneten Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie sind der Aufbau einer sauberen, sicheren und bezahlbaren Versorgung mit grünem Wasserstoff für Deutschland, um auf diese Weise die Dekarbonisierung wichtiger Endverbrauchssektoren, wie Industrie, Luft- und Schwerlastverkehr, zu ermöglichen. Zu diesem Zweck sollen Investitionen in den Ausbau der Kapazitäten für die Erzeugung von grünem Wasserstoff in Deutschland, der EU und darüber hinaus gefördert werden. Diese Investitionen sollen langfristig die Versorgung der deutschen Volkswirtschaft mit grünem Wasserstoff sicherstellen. Durch den Kapazitätsausbau und die damit verbundenen Skaleneffekte sollen zudem die Kosten pro Tonne Wasserstoff gesenkt werden. Grundlage dafür ist der Aufbau eines

internationalen Marktes für klimaneutralen Wasserstoff, den die Strategie ebenso fördern soll. Letzteres beinhaltet unter anderem die Entwicklung internationaler Standards für klimaneutralen Wasserstoff, die Schaffung förderlicher regulatorischer Rahmenbedingungen und einer geeigneten Qualitätsinfrastruktur sowie den kontinuierlichen Aufbau einer Transport- und Speicherinfrastruktur. Schließlich soll die Strategie den Aufbau einer international wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland sowie Technologieentwicklung und Innovation unterstützen. Letzteres ist Grundlage sowohl für Kostenreduktion und den erfolgreichen Einsatz des Energieträgers in den relevanten Endverbrauchssektoren als auch für die Entwicklung einer international führenden Wasserstoffindustrie.

Zentrales Themenfeld für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft ist die globale **Kosten- und Marktentwicklung**. Durch die Erfassung globaler Trends kann zum einen abgeschätzt werden, ob die notwendigen Fortschritte bei der Kostenreduktion realisiert werden. Zum anderen können Entwicklungen auf dem deutschen und europäischen Markt in Bezug auf den Ausbau von Kapazitäten für die Erzeugung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten mit anderen Regionen verglichen werden. Dies wird durch ein Monitoring der **Transport- und Speicherinfrastruktur** ergänzt. Damit werden Fortschritte beim Aufbau der physischen Infrastruktur für die globale Versorgung mit Wasserstoff sowie die Anbindung wichtiger Zentren der Nachfrage, darunter Deutschland und die Europäische Union (EU), erfasst.

Insbesondere in der Anfangsphase des Aufbaus einer globalen Wasserstoffwirtschaft ist die Entwicklung von Märkten und Infrastruktur, wie in anderen grünen Zukunftsmärkten, von **Politik und Regulierung** in wichtigen Vorreiterländern abhängig. Ebenso hat die Entwicklung der **Qualitätsinfrastruktur (einschließlich Standardisierung)**, in diesen Ländern einen wichtigen Einfluss auf die Entwicklung von Markt, Industrie und Technologie. Beide Themenfelder bieten vor diesem Hintergrund einen Überblick über Entwicklungen in zentralen Ländern einer globalen Wasserstoffwirtschaft.

Im Themenfeld **Forschung und Innovation** soll die Entwicklung der Forschungs- und Innovationskapazitäten im globalen Wasserstoffsektor verfolgt werden. Dabei sollen die Innovationskapazitäten in Deutschland, Europa und anderen Vorreiterländern verglichen werden. Auf diese Weise können Stärken und Schwächen sowie mögliche Risiken in Bezug auf die technologische Souveränität Deutschlands, bzw. Europas, identifiziert werden. Im Themenfeld **Industrie und Wertschöpfung** soll zudem die Entwicklung einer globalen Wasserstoffindustrie, die damit verbundenen Lieferketten und ihre Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung erfasst werden.

Schließlich werden auch die Auswirkungen einer entstehenden Wasserstoffherzeugung auf **Klima und Umwelt** thematisiert. Dies dient der Überprüfung von Fortschritten bei der Entwicklung einer umwelt- und klimafreundlichen Wasserstoffversorgung, insbesondere für Projekte mit deutscher Unterstützung. Hinzu kommen Fragen in Bezug auf **Governance und soziale Entwicklung** in den Ländern und Regionen, in denen der Ausbau von Produktionskapazitäten stattfindet, und die damit verbundenen Implikationen für die soziale Nachhaltigkeit einer globalen Wasserstoffwirtschaft.

---

## 3. Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftliche und technologische Souveränität

---

Die skizzierten Themenfelder des Monitorings geben einen umfassenden Überblick über wesentliche Entwicklungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft. In Ergänzung zu diesen acht Themenfeldern legt dieser Bericht und das vorgeschlagene Monitoringkonzept ein besonderes Augenmerk auf Fragen der Wettbewerbsfähigkeit sowie der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität. Es ist allerdings nicht sinnvoll, diese Aspekte als zusätzliche, isolierte Themenfelder zu behandeln. Vielmehr sind sie die Folge des Zusammenspiels verschiedener Entwicklungen innerhalb der bereits skizzierten Themenfelder. In dem Sinne werden Fragen der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit und der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität, aufbauend auf die ausgewählten Indikatoren der acht Themenfelder, in Teil C dieses Berichtes gesondert beleuchtet. Im Folgenden Abschnitt werden die zentralen Konzepte vorgestellt, die diesem Teilbereich des Monitoringansatzes zu Grunde liegen.

### 3.1 Wettbewerbsfähigkeit

Der wohl bekannteste Ansatz zur Erklärung wirtschaftlicher Wettbewerbsvorteile auf volkswirtschaftlicher Ebene ist das sogenannte Diamant-Modell (Diamond Model) von Michael Porter (Porter, 1990). Porter identifiziert vier interdependente Faktoren als Grundlage für die Herausbildung wettbewerbsfähiger Industriezweige: Die Verfügbarkeit wichtiger und nicht leicht replizierbarer Inputfaktoren, wie Humankapital und hochwertige Infrastruktur; eine wettbewerbsfähige Zulieferindustrie; signifikante und anspruchsvolle heimische Nachfrage nach den Produkten des Industriezweigs sowie ein hohes Maß an Wettbewerb zwischen den Anbietern auf diesem Heimmarkt. Ähnliche Elemente, wenn auch mit einem Schwerpunkt auf den institutionellen Voraussetzungen für hochwertige Forschung und Innovation, werden auch unter dem Begriff nationaler und regionaler Innovationsysteme zusammengefasst (Lundvall, 2007; Asheim, Isaksen & Trippel, 2019). Seit der Veröffentlichung dieser Ansätze hat zwar eine Vielzahl an neuer Forschung stattgefunden, es hat sich aber trotzdem kein neuer, konkurrierender Ansatz herausgebildet. Vielmehr hat es neue Erkenntnisse gegeben, in denen unter anderem neue Entwicklungen – wie die zunehmende Herausbildung globaler Wertschöpfungsketten und die wachsende Rolle Chinas – für die regionale Herausbildung wettbewerbsfähiger Industrien berücksichtigt wurden.

Eine wichtige Einsicht dieser Forschung ist, dass sich die Wettbewerbspositionen nationaler Industrien in Abhängigkeit von Industriezyklen bzw. damit verbundener Gelegenheitsfenster (*windows of opportunity*) herausbilden. An längere Phasen relativ stabiler Wettbewerbsdynamiken schließen sich Phasen der Veränderungen an. Diese können durch wichtige technologische Neuerungen, größere Marktveränderungen, wie bspw. wesentliche Veränderungen beim Nutzerverhalten, sowie durch wichtige regulative Veränderungen entstehen. Bei der Herausbildung grüner Zukunftsmärkte spielt Letzteres üblicherweise eine zentrale Rolle und bietet in der Anfangsphase der internationalen Marktentwicklung ein erstes Gelegenheitsfenster, um eine starke Wettbewerbsposition zu erlangen (Binz, Gosens, Yap, & Yu, 2020; Lee & Malerba, 2017).

Entwicklungen in den Wind- und Photovoltaik (PV)-Industrien haben allerdings gezeigt, dass Wettbewerbsvorteile, die aufgrund einer frühzeitigen Entwicklung des Heimmarktes erworben wurden (sogenannter *early mover advantages*) unterschiedlich stabil sind. Während europäische Hersteller von Windturbinen weiterhin eine starke Wettbewerbsposition auf dem Weltmarkt haben, konnten Hersteller von PV-Zellen und Modulen in Europa eine

entsprechende Wettbewerbsposition nicht verteidigen (Hughes & Quitzow, 2018; Quitzow, Huenteler, & Asmussen, 2017).

Forschung zu diesem Phänomen hat gezeigt, dass sich eine Reihe von technologiespezifischen Elementen feststellen lassen, die diese unterschiedlichen Entwicklungen erklären. Wettbewerbsvorteile in der PV-Industrie werden vorrangig über die Optimierung von relativ komplexen Produktionsprozessen erworben. Im Gegensatz dazu müssen bei der Herstellung von Windenergieanlagen eine Reihe von Komponenten unterschiedlicher Zulieferer integriert werden. Die Produktion qualitativ hochwertiger Windturbinen sowie die kontinuierliche Verbesserung der Performanz erfordern kontinuierliche Anpassungen beim Design der Windturbine sowie Feinjustierungen bei der Integration der Komponenten (Malhotra & Schmidt, 2020; Surana, Doblinger, Anadon, & Hultman, 2020).

Zur allgemeinen Charakterisierung von Technologien in diesem Sinne kann zwischen dem *Grad der Komplexität im Rahmen von Fertigungsprozessen*, auf der einen Seite, und der *Designkomplexität*, auf der anderen Seite, unterschieden werden. Analog dazu lassen sich auch idealtypisch die erforderlichen Kompetenzen zur Erlangung von Wettbewerbsvorteilen entlang dieser Merkmale unterscheiden. Industrien mit hoher Designkomplexität erfordern ein hohes Maß an technologiespezifischem Wissen sowie Kompetenzen für die Koordination der Zulieferindustrie im Rahmen der Wertschöpfungskette. In Industrien mit hoher Prozesskomplexität benötigen Hersteller allgemeines Erfahrungswissen im Umgang mit großskaligen Fertigungsprozessen, während komplexes technisches Wissen vielfach für den Bau der Produktionsanlagen erforderlich ist. Technologische Fortschritte finden häufig im Rahmen der Entwicklung neuer Produktionsanlagen statt und können, sofern verfügbar, durch den Kauf der Produktionsanlagen von Konkurrenten übernommen werden. Die Technologieführerschaft ist damit von geringerer Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller als in Technologiefeldern mit hoher Designkomplexität (Malhotra & Schmidt, 2020; Surana et al., 2020).

In Ergänzung dazu beeinflusst zudem der *Grad der Anpassung einzelner Technologieprodukte im Rahmen der Anwendung* den Erwerb von Wettbewerbsvorteilen und die räumliche Verteilung von Industrien. Bei Technologien, die bei der Anwendung stark an den jeweiligen Kontext angepasst werden müssen, bilden sich häufig regionale Lieferketten heraus, bei denen Firmen mit einer Präsenz in der Region größere Marktanteile halten. Die Notwendigkeit der Anpassung kann dabei physisch, infrastrukturell, regulativ sowie nachfragebedingt sein (Malhotra & Schmidt, 2020). Im erneuerbaren Energien-Sektor ist das zum Beispiel im Bereich von Bioenergie und Geothermie der Fall. Doch auch in der Windindustrie spielt die Anpassung an physische und klimatische Kontextbedingungen eine Rolle. Zusammen mit Herausforderungen beim Transport von Windturbinen hat das zu einer Industriestruktur geführt, in der die führenden Märkte in China, USA und Europa von regional verankerten Unternehmen angeführt werden. Im PV-Sektor hingegen hat sich ein globaler Markt mit einer hohen Konzentration der Produktionskapazitäten in China herausgebildet (Binz, Gosens, Hansen, & Hansen, 2017; Hughes & Quitzow, 2018).

Diese Einsichten zum Verhältnis zwischen Technologiemerkmale, Wettbewerbsvorteilen und Industriestruktur können auch zur Bewertung neuer Technologiemarkte, in diesem Fall Technologien und Wertschöpfungsketten im Rahmen einer Wasserstoffwirtschaft, herangezogen werden. Für einzelne Technologiefelder und Industriezweige können bspw. Abschätzungen zur Langlebigkeit von Wettbewerbsvorteilen vorgenommen werden. In Zusammenhang mit der Beobachtung der Kapazitäten nationaler Innovationsysteme sowie Dynamiken der Industrie- und Marktentwicklung können zudem die *Erfolgspotenziale nationaler oder regionaler Industrien* beurteilt werden.

Die folgende Grafik veranschaulicht die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Entwicklung von Wettbewerbsvorteilen nationaler oder regionaler Industriezweige. Während die Beschaffenheit einzelner Technologien nicht direkt beeinflusst werden kann, werden Marktentwicklung und heimische Innovationskapazitäten von strategischen Entscheidungen in Politik und Industrie, insbesondere in Anfangsphasen der Marktentwicklung, beeinflusst aber nicht entschieden. Das systematische Monitoring der Industriedynamik kann dabei helfen die Potenziale aber auch die Grenzen politischer Interventionen für den Aufbau wettbewerbsfähiger Industrien aufzuzeigen. Geeignete Dimensionen und Indikatoren für ein entsprechendes Monitoring werden in Teil C dieses Berichtes näher erläutert.



- Beeinflusst die Rolle technologiespezifischer Wettbewerbsvorteile sowie die Industriestruktur
- Nicht durch politische oder unternehmerische Entscheidungen beeinflussbar
- Beeinflusst Chancen und Gelegenheitsfenster für den Erwerb von Wettbewerbsvorteilen
- Wird durch politische und unternehmerische Entscheidungen beeinflusst
- Beeinflusst Marktentwicklung sowie die Entwicklung von Kapazitäten nationaler Innovationssysteme
- Wird durch politische und unternehmerische Entscheidungen bestimmt

Abbildung 2: Einflussfaktoren auf Wettbewerbsfähigkeit

### 3.2 Wirtschaftliche und technologische Souveränität

Neben dem Ziel der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit wird zunehmend auch der Begriff der Technologiesouveränität als ein Gesichtspunkt innovations- und wirtschaftspolitischen Handelns angeführt. Dabei ist die genaue Bedeutung des Begriffes häufig nicht eindeutig definiert. Im Folgenden richten wir uns nach der Definition von (Edler et al., 2020). Sie definieren Technologiesouveränität als „die Fähigkeit eines Staates oder Staatenbundes, die Technologien, die er für sich als kritisch für Wohlfahrt, Wettbewerbsfähigkeit und staatliche Handlungsfähigkeit definiert, selbst vorzuhalten und weiterentwickeln zu können oder ohne einseitige strukturelle Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen beziehen zu können“ (Edler et al., 2020, S. 2). Dabei weisen sie darauf hin, dass Technologiesouveränität ein Teilaspekt wirtschaftlicher Souveränität ist, zu dem auch der ungehinderte Zugang zu kritischen Ressourcen zählt. Ziel ist es einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden und die Möglichkeit zum Aufbau und Erhalt eigener technologischer Fähigkeiten zu bewahren. Ob eine Technologie oder eine Ressource für einen Staat oder Staatenbund als kritisch einzustufen ist, hängt davon ab, ob sie zur Sicherung originär staatlicher

Aufgaben, grundlegender gesellschaftlicher Bedürfnisse oder zur Sicherung des mittel- und langfristigen Erfolgs einer Volkswirtschaft und ihrer technologischen Wettbewerbsfähigkeit dient.

Wasserstofftechnologien können einen entscheidenden Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrs-, Industrie- und Wärmesektors leisten. Außerdem ermöglichen sie die Speicherung und den Transport erneuerbarer Energien. Es wird erwartet, dass sich die wirtschaftliche Bedeutung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in Zukunft weiter erhöhen wird. Darum handelt es sich um kritische Technologien, die für Deutschland und die EU sowohl wirtschaftlich als auch klimapolitisch von entscheidender Bedeutung sind. Ein maximales Maß an wirtschaftlicher und technologischer Souveränität besteht, wenn die Versorgung mit Wasserstoff sowie die Technologien zu seiner Herstellung vollständig durch Kapazitäten innerhalb der EU gesichert sind. Wo das nicht zutrifft, ist zu bewerten, welche Abhängigkeiten bestehen und welche Versorgungsrisiken damit einhergehen. Darauf basierend kann der aktuelle und angestrebte Grad an wirtschaftlicher und technologischer Souveränität bestimmt werden und gegebenenfalls Strategien für den Erhalt oder die Stärkung von Technologiesouveränität entwickelt werden. Wie erläutert, werden Fragen der technologischen und wirtschaftlichen Souveränität in dem hier vorgestellten Monitoringkonzept nicht als eigenes Themenfeld behandelt. Stattdessen werden, aufbauend auf den hier skizzierten Elementen, relevante Indikatoren und Datenquellen der acht Hauptthemenfelder zusammengeführt, um eine vertiefte Analyse durchzuführen.

---

## 4. Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands

---

Von der Erzeugung des Wasserstoffs, über die Speicherung und den Transport, zur Anwendung und Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu synthetischen Folgeprodukten und deren Anwendung, umfasst die globale Wasserstoffwirtschaft zahlreiche unterschiedliche Technologie- und Wirtschaftsfelder. Es ist daher notwendig den Betrachtungsgegenstand eines systematischen Monitorings einzugrenzen. Das hier vorgestellte Monitoringkonzept fokussiert zunächst auf den Markthochlauf von klimaneutralem und nachhaltigem Wasserstoff, da dieser die Hauptzielsetzung der nationalen Wasserstoffstrategie darstellt.

Entsprechend der Farbenlehre des Wasserstoffs liegt der Fokus zudem auf der Herstellung von „grünem“ Wasserstoff (siehe Kasten unten). Dabei handelt es sich um klimaneutralen Wasserstoff aus erneuerbarem Strom. Da dieser Begriff irreführend sein kann und einheitliche Standards zu seiner Definition bisher fehlen, wird im Folgenden zunächst allgemein von strombasierter Wasserstofferzeugung bzw. strombasierter Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Quellen gesprochen. Teil des Monitorings sollten zunächst alkalische Elektrolyseure, Protonen-Austausch-Membranen (PEM)-Elektrolyseure und Festoxid-Elektrolyseurzelle (SOEC)-Elektrolyseure sein, da diese Technologien eine entsprechende Marktreife erlangt haben. Abhängig von der technologischen Entwicklung können auch weitere Herstellungsverfahren zu einem späteren Zeitpunkt in ein systematisches Monitoring aufgenommen werden.

Blauer Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen, größtenteils Erdgas- und Erdölreformierung, bei dem Kohlendioxid abgeschieden und gespeichert, bzw. weiterverarbeitet, wird, wird im hier vorgestellten Monitoringkonzept nur als Vergleichsgröße bspw. bei der Kosten- und Marktentwicklung oder im Themenfeld Klima und Umwelt aufgenommen. Türkiser Wasserstoff, bei dem Erdgas durch Pyrolyse in Wasserstoff und festen Kohlenstoff zersetzt wird, befindet sich noch in der Entwicklung und dient im Monitoring ebenfalls nur zum Vergleich. Je nach politischer Schwerpunktsetzung wäre es allerdings denkbar, auch diese Herstellungsoptionen analog zu den Technologieoptionen für die Herstellung von grünem Wasserstoff in das vertiefte Monitoring aufzunehmen.

Im Speicher- und Transportbereich fokussiert der Monitoringansatz auf Gasnetze und Pipelines sowie auf flüssige organische Wasserstoffträger. Zudem liegt der Fokus auf neuer Infrastruktur für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff. Bestehende Infrastruktur, die auch für chemische Folgeprodukte verwendet werden kann, ist im Monitoringkonzept nicht enthalten. Das Monitoringkonzept umfasst zudem die Weiterverarbeitung von Wasserstoff in synthetisches Methan, Ammoniak, Methanol und synthetische Brennstoffe, da diese direkt durch den Ausbau strombasierter Wasserstoffproduktion beeinflusst werden. Erwartungsgemäß wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe und anderer Folgeprodukte simultan mit der Wasserstoffproduktion ansteigen. Nur die Ammoniakproduktion, die heutzutage Wasserstoff von außen bezieht, existiert bereits in großem Maßstab und kann direkt auf die Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff umstellen.

Um die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff zu bestimmen, werden schließlich Anwendungsfelder im Verkehrs- und Industriesektor, beispielsweise in der Stahlproduktion, in das Monitoringkonzept aufgenommen. Nachfrage nach Wasserstoff kann ebenfalls in den Strom- und Wärmesektoren entstehen, allerdings ist davon auszugehen, dass eine Anwendung in diesen Bereichen in naher Zukunft nicht sinnvoll sein wird. Das Potenzial der direkten Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors durch Strom aus erneuerbaren Energien ist weltweit noch lange nicht ausgereizt und auch im Wärmesektor stehen effizientere alternative Technologien, bspw. Wärmepumpen, zur Verfügung.

Schließlich stehen Brennstoffzellen in direktem Zusammenhang mit der strombasierten Wasserstoffproduktion und liefern einen bedeutenden Anteil an der Wertschöpfung im Verkehrssektor. Brennstoffzellentechnologien

werden daher im Monitoringkonzept im Rahmen der Marktentwicklung erfasst. Eine vertiefte Betrachtung dieser Technologie, analog zu Technologien zur Herstellung von strombasiertem Wasserstoff, ist im Monitoringkonzept nicht vorgesehen, wäre aber grundsätzlich möglich.

## **Kasten 1: „Grüner“ Wasserstoff und seine Folgeprodukte**

"Grüner" Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser mittels elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt. Die Wasserelektrolyse kann sowohl bei hoher als auch bei niedriger Temperatur durchgeführt werden, wobei letztere derzeit den Großteil der etablierten Verfahren umfasst. Dazu gehören die alkalische Elektrolyse und die Elektrolyse mittels PEM. Auch die Hochtemperatur-Elektrolyse gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei die sogenannte SOEC aufgrund ihrer hohen Effizienz die vielversprechendste Option darstellt.

Das so gewonnene Wasserstoffgas kann gespeichert, auf vielfältige Weise weiterverwendet und verarbeitet werden. Die bekanntesten Verfahren sind die Methanisierung, die Ammoniak-synthese, das Fischer-Tropsch-Verfahren und die Methanolsynthese.

Bei der Methanisierung werden grüner Wasserstoff und Kohlendioxid in (synthetisches) Methan umgewandelt. Das Verfahren verwendet einen Katalysator auf Nickelbasis und wird bereits kommerziell eingesetzt. Synthetisches Methan hat den großen Vorteil, dass es Erdgas in einer Vielzahl von Anwendungen sofort substituieren kann, da es unter Nutzung bereits bestehender Infrastruktur und vorhandener Geräte verwendet wird.

Mehr als die Hälfte des weltweit produzierten Wasserstoffs wird derzeit für die Ammoniak-synthese genutzt, die wiederum überwiegend für die Produktion von stickstoffbasierten Düngemitteln eingesetzt wird. Strombasierter Wasserstoff auf der Basis erneuerbarer Energien kann daher bei der Dekarbonisierung der Agrarindustrie helfen, da er sich leicht in bestehende Produktionsprozesse und Infrastrukturen integrieren ließe.

Bei der Fischer-Tropsch-Synthese wird aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid ein Roh-Flüssigkraftstoff hergestellt, welcher daraufhin zum gewünschten synthetischen Kraftstoff, wie Diesel, Benzin oder Kerosin raffiniert wird. Diese synthetischen Endprodukte sind chemisch identisch mit ihren jeweiligen fossilen Varianten und können daher entweder mit diesen beigemischt werden oder sie ganz ersetzen. Die Gesamtkosten sind jedoch nach wie vor hoch, bedingt durch die Investitionskosten und Kosten für den Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien.

Wasserstoff bildet zudem einen Grundstoff für die Methanolsynthese. Das erzeugte Methanol kann entweder alternativ zum Fischer-Tropsch-Verfahren zu synthetischen Kraftstoffen weiterverarbeitet oder direkt genutzt werden. Methanol ist einer der weltweit am häufigsten eingesetzten Rohstoffe für chemische Anwendungen. So ist Methanol im Methanol-zu-Olefinen-Verfahren ein Grundstoff für die Herstellung von Propylen und Ethylen, die wiederum Ausgangsstoffe für die Kunststoffindustrie darstellen. Eine weitere wichtige Anwendung von Methanol ist die Produktion von Formaldehyd, das zur Herstellung von Kunstharzen verwendet wird.

# TEIL B: Das Monitoringkonzept

In Teil B des Berichtes werden die acht Themenfelder für das Monitoring (siehe Abbildung 1) im Detail vorgestellt. Für jedes der Themenfelder werden zunächst die Zielsetzungen und zentralen Fragestellungen für das Monitoring dargestellt. Im Anschluss wird der bestehende Wissensstand zusammenfassend sowie die Verfügbarkeit relevanter Daten für das Monitoring im Themenfeld dargestellt. Schließlich wird vor diesem Hintergrund das Monitoringkonzept für das jeweilige Themenfeld vorgestellt, einschließlich einschlägiger Indikatoren und dazugehöriger Datenquellen.

---

# 1. Kosten- und Marktentwicklung

---

## 1.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Die Herstellung von grünem und klimafreundlichem Wasserstoff ist bisher ein Nischenmarkt, mit geringer Nachfrage bei gleichzeitig schwacher Konkurrenz. Bei steigender Nachfrage, wie sie in der Europäischen Union angestrebt wird, wird der Markt voraussichtlich stark anwachsen und sich weiterentwickeln (E4Tech, 2019; Wietschel et al., 2020). Jedoch fördern auch andere Staaten, wie Japan, die USA, China, Kanada oder Australien, die Entwicklung eines globalen Wasserstoffmarktes. Dadurch entstehen unterschiedliche Marktbedingungen, die die Entwicklung von Technologien und damit verbundenen Wertschöpfungsketten prägen.

Vor diesem Hintergrund soll das Monitoring aktuelle Daten über die internationalen Marktentwicklungen bereitstellen. Aktuelle Daten zu Nachfrage nach Wasserstoffprodukten in unterschiedlichen Anwendungsbereichen geben Aufschluss darüber, wie sich die Absatzmärkte entwickeln und welche Marktpotenziale einzelne Technologien haben. Mithilfe aktueller Daten zu den Gesteigungs- und Betriebskosten lässt sich die Performanz deutscher und europäischer Unternehmen entlang bestimmter Kostenziele bewerten und mit anderen Ländern vergleichen. Außerdem können mittels der Kosten unterschiedliche Technologien miteinander verglichen werden. Schließlich kann anhand von Daten zu Produktionskapazitäten von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte der Anteil deutscher bzw. europäischer Kapazitäten am Weltmarkt bestimmt werden.

## 1.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

In Anbetracht der derzeitigen Entwicklungen und politischen Initiativen im Wasserstoffsektor, insbesondere in Deutschland und Europa, wird der Markt deutlich anwachsen. In diesem Zusammenhang wurde eine Vielzahl an Prognosen und Modellen zum zukünftigen Markt für sauberen Wasserstoff aus erneuerbaren Energien oder anderer CO<sub>2</sub>-armer Herstellungsmethoden, sowie der Folgeprodukte und Anwendungen, veröffentlicht (Aurora Energy Research, 2021; Bloomberg NEF, 2020; Element Energy, 2018; Frontier Economics, 2018; Gazis, 2020; Hydrogen Council, 2020; Hydrogen Europe, 2020; IEA, 2019; IRENA, 2018, 2019; Mayyas, Ruth, Pivovar, Bender, & Wipke, 2018; Pflugmann & De Blasio, 2020; Trinomics, 2020). Prognos hat beispielsweise 2020 eine umfassende Studie zu Kosten und Transformationspfaden für strombasierte Energieträger veröffentlicht (Prognos, 2020). Außerdem haben das National Renewable Energy Laboratory (NREL) und Frontier Economics Modelle zur Kostenberechnung entworfen (Frontier Economics, 2018; NREL, 2018). Diese Studien fokussieren auf techno-ökonomische Bewertungen der Gesteigungskosten von Wasserstoff, der Transportkosten, sowie teilweise auf die Kosten der Umwandlung von Wasserstoff in synthetische Treibstoffe. Die Gesteigungskosten teilen sich dabei in die Energiekosten (in Form von elektrischem Strom oder fossilen Energieträgern), die Rohstoffkosten (Wasser und Kohlendioxid für die Syntheseprodukte), sowie die Anlagen- und Betriebskosten. Die zukünftige Nachfrage nach Wasserstoff wird in den bisherigen Studien unterschiedlich modelliert. Teilweise wird die Größe des Absatzmarkts anhand von Roadmaps und Strategien der Politik und Industrie bestimmt, und teilweise wird der Absatzmarkt aus den Klimazielen abgeleitet. Daten zu den tatsächlichen Gesteigungskosten von sauberem Wasserstoff und strombasierter Folgeprodukte liegen nicht, oder nur in einem sehr kleinen Maßstab, vor. Da sich der Markt für sauberen Wasserstoff in der Entstehungsphase befindet, liegen ebenfalls keine umfassenden Daten zu den Handelspreisen von strombasiertem Wasserstoff vor. Die wichtigsten Datenquellen für das Monitoring der Kosten und Marktentwicklung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Bisher fließen über drei Viertel der weltweiten Wasserstoffproduktion in Erdölraffinerien und in die Ammoniakproduktion, welches zur Düngemittelproduktion benötigt wird (IEA, 2019). Die restliche Nachfrage teilt sich in chemische Industrie, die Verarbeitung von Stahl und Metall, Glasverarbeitung und die Nahrungsmittelverarbeitung. Außerdem wird Wasserstoff bereits im Energiesektor (vor Allem in der Chlor-Alkali-Produktion) und im

Verkehrssektor, für Brennstoffzellenfahrzeuge, angewendet (Hydrogen Europe, 2020; IEA, 2019; NREL, 2018). In Zukunft werden weitere Anwendungen im Gebäude- und Wärmesektor (sowohl zum Heizen, als auch zur gasbasierten Kühlung), in der Stahlherstellung (klimafreundliche Direktreduktion durch Wasserstoff, statt durch Erdgas oder, wie in Deutschland, durch Verhüttung in Kohlehochöfen), und hauptsächlich in der Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu synthetischen Kraftstoffen und anderen Power-to-X (PtX) Produkten erwartet (Bloomberg NEF, 2020; Hydrogen Council, 2020; Hydrogen Europe, 2020; IEA, 2019).

Weltweit werden heute etwa 70 Mt Wasserstoff produziert.<sup>1</sup> Bei dem Wasserstoff, der heutzutage Anwendung findet handelt es sich fast ausschließlich (etwa 90 Prozent) um grauen Wasserstoff aus fossilen Energieträgern, der direkt für die Anwendung, vor Ort produziert wird, oder als Beiprodukt aus Koksofengas, der Chlor-Alkali-Produktion und anderen chemischen Herstellungsverfahren anfällt (Hydrogen Europe, 2020). Die Produktion von grünem Wasserstoff aus erneuerbarem Strom macht nur 0,7 Prozent der weltweiten Wasserstoffproduktion aus (IEA, 2019). In den meisten Studien werden Produktionskapazitäten verwendet, um Lernkurven und Kostenreduktion für die einzelnen Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien vorherzusagen (Bloomberg NEF, 2020; Christensen, 2020; Glenk & Reichelstein, 2019; IEA, 2019; IRENA, 2020; Merten et al., 2020; Pflugmann & De Blasio, 2020; Schmidt et al., 2017). Diese variieren stark in den einzelnen Studien, da sie auf unterschiedlichen Annahmen und Modellen beruhen, die wiederum auf teilweise stark veralteten Daten beruhen, wie Glenk und Reichelstein (2019) ausführlich gegenübergestellt haben.

| Datenquelle und Organisation  | Beschreibung   | Regionale Abdeckung  | Stand und Modus der Aktualisierung                       |
|---|--|--|--|
| Hydrogen Project Database – IEA (Erstellt durch das IEA TCP)            | Umfassende Datenbank zu aktuellen und geplanten Wasserstoff- und PtX-Projekten, inklusive der Produktionskapazitäten               | Weltweit   | Halbjährig aktualisiert / Neue Veröffentlichung steht an |
| Hydrogen Review – IEA   | Bericht zu den aktuellen technischen, politischen und ökonomischen Entwicklungen im Wasserstoffsektor                              | Weltweit   | Jährliche Aktualisierung                                 |
| IPHE  | Jährliche Berichte der Partnerländer zu Politik, Regulierung und Produktionskapazitäten im Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor | Weltweit (Umfasst alle wichtigen Staaten in der Partnerschaft) | Jährliche Aktualisierung                                 |
| FCHO  | Datenbank zu Nachfrage und Produktionskapazitäten im europäischen Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor                          | EU, weltweit (nur ausgewählte Länder)                          | Kontinuierliche Aktualisierung                           |
| Hydrogen Insights – Hydrogen Council (Erstellt durch McKinsey)          | Jährlicher Bericht zur globalen Entwicklung des Wasserstoff- und Brennstoffzellenmarktes   | Weltweit   | Jährliche Aktualisierung                                 |
| H2A – National Renewable Energy Laboratory (NREL)                       | Modell der Produktionskosten von elektrolytischem Wasserstoff aus zentralen und dezentralen Anlagen                                | USA  | Aktueller Stand 2018, soll aktualisiert werden           |
| Fuel Cell Industry Review – E4Tech                                      | Bericht zu Industrie- und Marktentwicklungen im Brennstoffzellensektor   | Weltweit (Fokus auf EU)  | Jährliche Aktualisierung                                 |
| PtG/PtL-Rechner – Frontier Economics                                    | Ökonomisches Modell der Produktionskosten synthetischer Folgeprodukte  | EU   | Kontinuierliche Aktualisierung                           |
| European Hydrogen Market Attractiveness Report – Aurora Energy Research | Bewertung des Marktpotenzials für Wasserstoff in Europa, und Analyse von Markttreibern   | EU   | Jährliche Aktualisierung                                 |

**Tabelle 1: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Kosten- und Marktentwicklungen im Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor**

<sup>1</sup> Zusätzlich werden noch etwa 45 Mt Wasserstoff jährlich in Form von Gasgemischen konsumiert (IEA, 2019).

Die International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)<sup>2</sup>, in der alle wichtigen Produktionsländer für Wasserstoff und Brennstoffzellen Mitglieder sind, sammelt offizielle Daten zum Ausbau der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in den einzelnen Mitgliedsländern. Diese Daten können als Grundlage für das Monitoring der Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukte dienen. Ausführliche Daten zum aktuellen Brennstoffzellenmarkt liefert E4Tech in ihrem jährlichen Fuel Cell Industry Review (E4Tech, 2020). Das Wasserstoff Technology Cooperation Programme (TCP) der IEA veröffentlicht die größte Datenbank zu bestehenden und geplanten Projekten im Wasserstoffsektor (IEA, 2020). Diese Datenbank beinhaltet alle Projekte zur Herstellung oder Anwendung von Wasserstoff im Energiesektor, oder zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit. Sie beinhaltet Informationen zum Stand der Projekte, zur Laufzeit und Produktionskapazität, sowie zu den verwendeten Technologien. Ähnliche Datenbanken werden durch die Industrieverbände Hydrogen Council und Hydrogen Europe, sowie durch Aurora Energy Research geführt. Diese sind nicht öffentlich, fließen allerdings in die Datenbank des IEA TCP ein, die einen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

### 1.3 Monitoringkonzept

Die Datenlage zu Kosten- und Marktentwicklungen ist äußerst fragmentiert und dynamisch. Um einen Überblick über aktuelle Entwicklungen zu erhalten und die Positionierung deutscher, bzw. europäischer Unternehmen auf dem globalen Wasserstoffmarkt zu beurteilen, ist es notwendig die Daten systematisch zusammenzuführen und kontinuierlich zu beobachten. Folgende Daten zu Kosten- und Marktentwicklungen auf dem globalen Wasserstoffmarkt sollten in einem kontinuierlichen und systematischen Monitoring zusammengetragen und nach Ländern und Regionen erhoben werden:

#### Gestehungs- und Vertriebskosten (Preise) von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte

Anhand der techno-ökonomischen Analysen und Modelle können die Gestehungskosten von Wasserstoff auf regionaler Ebene erhoben werden. Hierbei muss zwischen strombasiertem Wasserstoff, und emissionsreduziertem Wasserstoff aus fossilen Energieträgern mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Verwendung (CCU)/ CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS) unterschieden werden. Außerdem sollten die unterschiedlichen Elektrolysetechnologien (ALK, PEM, SOEC, ggf. weitere Technologien) getrennt voneinander betrachtet werden, da sie sich technologisch teilweise stark voneinander unterscheiden. Ebenfalls relevant für ein systematisches Monitoring ist die Unterscheidung von zentralen Anlagen, welche den Strom aus dem Netz beziehen und dezentralen Anlagen mit angeschlossener Stromproduktion. Ergänzend zu den Wasserstoffkosten, sollte auch die Gestehungskosten der Folgeprodukte erhoben werden. Dabei sei zwischen synthetischem Methan, Ammoniak und synthetischen Kraftstoffen durch Methanolsynthese und Fischer-Tropsch-Verfahren zu unterscheiden. In Tabelle 2 werden die entsprechenden Indikatoren und Datenquellen zusammenfassend dargestellt.

Als Datengrundlage dienen das Hydrogen Analysis (H<sub>2</sub>A)-Modell von NREL für den amerikanischen Wasserstoffmarkt und der PtG/PtL-Rechner von Frontier Economics, sowie die Hydrogen Insights des Hydrogen Council und der Hydrogen Review der IEA. Anhand einzelner Studien zu Pilotprojekten lassen sich die Vertriebskosten (Preise) beobachten. Dies wird in Zukunft ein entscheidender Indikator sein. Bisher liegen allerdings keine ausreichenden Daten vor, um einen globalen Überblick zu gewinnen.

<sup>2</sup> Verfügbar unter: <https://www.iphe.net/>.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark | Datenquelle  |
|--|-----------------------|--|
| <i>Gestehungskosten nach Herstellungsmethode</i>     |                       |  |
| Elektrolyse - ALK                                    | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner); Hydrogen Council (Insight) |
| Elektrolyse - PEM                                    | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner); Hydrogen Council (Insight) |
| Elektrolyse - SOEC                                   | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner); Hydrogen Council (Insight) |
| Methan-Pyrolyse                                      | Euro/MWhel            | n.d.   |
| Reformierung + CCU/CCS                               | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Hydrogen Council (Insight)                                       |
| <i>Gestehungskosten nach Anlage</i>                  |                       |  |
| Zentral  | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)                             |
| Dezentral  | Euro/MWhel            | NREL (H2A); Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)                             |
| <i>Gestehungskosten nach Produkt</i>                 |                       |  |
| Synthetisches Methan                                 | Euro/MWhel            | Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)   |
| Synthetischer Ammoniak                               | Euro/MWhel            | Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)   |
| Synthetische Brennstoffe – Methanolsynthese          | Euro/MWhel            | Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)   |
| Synthetische Brennstoffe – Fischer-Tropsch-Verfahren | Euro/MWhel            | Frontier Economics (PtG/PtL-Rechner)   |

Tabelle 2: Indikatoren für das Monitoring der Gestehungskosten von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte

## Nachfrage nach Wasserstoff und Folgeprodukten in unterschiedlichen Anwendungsfeldern

Um die Entwicklung der weltweiten Absatzmärkte einschätzen und verfolgen zu können, braucht es Informationen zur Nachfrage nach Wasserstoff und der Folgeprodukte im Verkehrs-, Industrie, Wärme- und Umwandlungssektor, sowie bei der energetischen Umwandlung in Elektrizität und synthetische Kraftstoffe. Dazu bedarf es Informationen über den Einsatz von Brennstoffzellen in den unterschiedlichen Sektoren. Im Industriesektor sollte die potenzielle Nachfrage in der Ammoniakproduktion, der Chemieindustrie und der Stahl- und Metallindustrie erhoben werden. Wasserstoffkonsum von Ölraffinerien trägt größtenteils nicht zum Nettobedarf bei, da er durch die Petrochemie direkt vor Ort aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die entsprechenden Indikatoren und Datenquellen.

Die Nachfrage wird in Zukunft ebenfalls durch Einspeisungen in Wasserstoffnetze, und teilweise in der Stromproduktion und Kraft-Wärme-Kopplung, zur Überbrückung von Schwankungen anderer erneuerbarer Stromquellen, sowie zur Wärmeerzeugung in der Industrie und im Gebäudesektor, ansteigen. Außerdem wird auch die Produktion von synthetischen Kraftstoffen die Nachfrage nach reinem Wasserstoff erhöhen.

Daten zu den weltweiten Absatzmärkten in den traditionellen Anwendungsbereichen werden von der IEA erhoben. Das FCHO veröffentlicht diese Daten für Europa. Außerdem veröffentlicht der Hydrogen Council Daten zu den Absatzmärkten. Da diese Daten in aggregiertem Zustand noch nicht vorliegen, wird es nötig sein Daten separat für die einzelnen Anwendungsbereiche von Industrieverbänden und Forschungsinstituten zu erheben. Daten zur Nachfrage im Verkehrssektor und für die Herstellung synthetischer Folgeprodukte können von der IPHE und der IEA bezogen werden.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark   | Datenquelle                                    |
|--|-------------------------|--|
| <i>Nachfrage im Verkehrssektor</i>                 |                         |  |
| Schienenverkehr                                    | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| ÖPNV   | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| Schwerlasttransport                                | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| Flugverkehr  | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| Personenverkehr                                    | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| Sonstige (z.B. Gabelstapler)                       | MWhel/Jahr              | IPHE; E4Tech (Fuel Cell Industry Review)       |
| <i>Nachfrage im Industriesektor</i>                |                         |  |
| Ammoniakproduktion                                 | MWhel/Jahr              | IEA Data Center; FCHO; IIPI                    |
| Chemieindustrie                                    | MWhel/Jahr              | IEA Data Center; FCHO; IIPI                    |
| Stahl- und Metallindustrie                         | MWhel/Jahr              | IEA Data Center; FCHO; IIPI                    |
| <i>Nachfrage im Umwandlungssektor</i>              |                         |  |
| Stromproduktion                                    | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Kraft-Wärme-Kopplung                               | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Wärmeerzeugung                                     | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Synthetisches Methan                               | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Synthetischer Ammoniak                             | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Synthetische Brennstoffe – Methanolsynthese        | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Synthetische Brennstoffe – Fischer-Tropsch         | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| <i>Nachfrage in der Speicherung und Verteilung</i> |                         |  |
| Speicherung  | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Verteilernetze                                     | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| Wasserstoff-Tankstellen                            | MWhel/Jahr              | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE      |
| <i>Brennstoffzellen im Einsatz</i>                 |                         |  |
| Verkehrssektor gesamt                              | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| Schienenverkehr                                    | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| ÖPNV   | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| Schwerlasttransport                                | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| Personenverkehr                                    | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| Sonstige (z.B. Gabelstapler)                       | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |
| Stromproduktion                                    | Anzahl Brennstoffzellen | IPHE, FCHO, E4Tech (Fuel Cell Industry Review) |

Tabelle 3: Indikatoren für das Monitoring der globalen Nachfrage nach Wasserstoff

## Produktionskapazitäten von Wasserstoff und der Folgeprodukte nach Herstellungsmethode

Die Angebotsseite umfasst die weltweiten Produktionskapazitäten von reinem Wasserstoff, sowie der synthetischen Folgeprodukte. Um die Marktanteile einzelner Technologien einschätzen zu können, sollten Produktionskapazitäten nach den verschiedenen Elektrolýsetechnologien und Herstellungsverfahren erhoben werden. Außerdem sollte auch die Produktion von Folgeprodukten zwischen Ammoniak, Methan und synthetischen Kraftstoffen unterschieden werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über entsprechende Indikatoren und Datenquellen.

Die Projektdatenbank des Wasserstoff TCP der IEA liefert umfassende Daten zu Produktionskapazitäten, u.a. nach Herstellungsmethode und Produktionsstandort. Diese soll in Zukunft viertel- bis halbjährig aktualisiert werden und könnte als Grundlage für ein systematisches Monitoring dienen. Außerdem führt Hydrogen Europe eine Datenbank zu Wasserstoffprojekten in Europa. Aggregierte Daten für einzelne Staaten sind über das IPHE verfügbar.

| <b>Indikator</b>                                  | <b>Einheit/<br/>Benchmark</b> | <b>Datenquelle</b>                        |
|---|-------------------------------|---|
| <i>Produktionskapazitäten von Wasserstoff</i>     |                               |   |
| Elektrolyse - ALK                                 | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE |
| Elektrolyse - PEM                                 | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE |
| Elektrolyse - SOEC                                | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE |
| Methan-Pyrolyse                                   | MWel/Jahr                     | n.d.                                      |
| Reformierung + CCU/CCS                            | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database); IPHE |
| <i>Produktionskapazitäten nach Anlage</i>         |                               |   |
| Zentral   | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database)       |
| Dezentral   | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database)       |
| <i>Produktionskapazitäten nach Folgeprodukten</i> |                               |   |
| Synthetisches Methan                              | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database)       |
| Synthetischer Ammoniak                            | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database)       |
| Synthetische Brennstoffe                          | MWel/Jahr                     | IEA TCP (Hydrogen Project Database)       |

**Tabelle 4: Indikatoren für das Monitoring der globalen Produktionskapazitäten von Wasserstoff und synthetischer Folgeprodukte**

## 2. Transport- und Speicherinfrastruktur

### 2.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Die Marktentwicklung von Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte und damit die globale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands hängen stark von den Transport-, Verteil- und Speichermöglichkeiten (siehe Kasten 2 zu den wichtigsten Technologieoptionen) des flüchtigen Gases ab. Beispielsweise wird Deutschland strombasierten Wasserstoff importieren müssen, um die Bedarfe effizient decken zu können. Der infrastrukturelle Anschluss der Wasserstoffexportländer wird in diesem Zusammenhang eine zentrale aber zugleich kapital- und kostenintensive Aufgabe. Das Monitoring ermöglicht den Infrastrukturausbau zu überwachen, Bedarfe und Potenziale in anderen Ländern zu identifizieren. Da für die Wasserstoffsyntheseprodukte zum Großteil die bestehende Gas- und Kraftstoffinfrastruktur genutzt werden kann, konzentriert sich das Monitoring allein auf Transport und Speicherung von reinem Wasserstoff.

#### **Kasten 2: Technologien für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff**

- Druckgasspeicherung:

Wasserstoff wird durch Kompressoren auf Hochdruck von bis zu 800 bar verdichtet, wobei ein Verlust von etwa 12% des gespeicherten Energieinhaltes entsteht (Kurzweil & Dietlmeier, 2018). Besonders hohe Speicherpotentiale haben unterirdische Gasspeicher in Salzkavernen, wo schon jahrelange Erfahrung mit der Wasserstoffspeicherung besteht und es kaum Diffusionsverluste gibt. Die Nutzung der Kavernen steht in Konkurrenz zur Nutzung als Erdgasspeicher. Auch in Rohrleitungen und speziellen Behältern kann Wasserstoff unter Hochdruck und damit mit effizienter Energiedichte erfolgreich gespeichert werden. Es besteht weiterhin die Möglichkeit zur Beimischung von Wasserstoff in Erdgasnetze, wobei derzeit maximale Beimischungsquoten von 20 bis 30% diskutiert werden wegen der eingeschränkten Wasserstoffverträglichkeit von Endanwendungen. Alternativ wäre eine Transformation der Infrastruktur, die bisher zum Transport und der Verteilung von Erdgas genutzt wurde, zu einer reinen Wasserstoffinfrastruktur. Es können auch neue Wasserstoffnetze aufgebaut werden, wobei einige heute auch schon bestehen.

- Flüssigwasserstoffspeicherung:

Zur Verflüssigung wird der Wasserstoff auf unter  $-240\text{ °C}$  stark gekühlt und auf über 13 bar verdichtet. Dies führt zu Energieverlusten von bis zu 45% bezogen auf die gespeicherte Energiemenge (Kurzweil & Dietlmeier, 2018). Des Weiteren gibt es Verdampfungsverluste bis zu 3% am Tag. Die Rohrleitungen und Flüssiggasbehälter müssen zwar nicht für Hochdruck ausgelegt werden, brauchen dafür jedoch eine immense Wärmeisolierung, um die tiefen Temperaturen halten zu können. Weiterhin müssten beim Schiffstransport entsprechende Spezialschiffe gebaut werden, was auch für den Transport via Lastkraftwagen (LKW) gilt.

- **Flüssige organische Wasserstoff (LOHC):**

Der Wasserstoff wird mit der sogenannten Hydrierung chemisch an eine ungesättigte Verbindung, dem LOHC, gebunden, wobei Wärme freigesetzt wird. Das hydrierte LOHC kann dann problemlos transportiert und gespeichert werden, da seine physikalischen und chemischen Eigenschaften derer konventioneller Kraftstoffe entsprechen. Durch Dehydrierung kann der Wasserstoff dann wieder mit einer endothermen Reaktion freigesetzt werden (Reuß et al., 2017). Beide Prozesse gemeinsam führen zu Energieverlusten von über 50% des gespeicherten Wasserstoffs.

Zudem kann die Energie des Wasserstoffs auch chemisch in Folgeprodukten gespeichert werden, wozu jedoch CO<sub>2</sub> (oder N<sub>2</sub>) mit gewissem Reinheitsgrad benötigt wird:

- **Synthetisches Methan (CH<sub>4</sub>):** Dies kann problemlos dem Erdgasnetz zugeführt werden, so dass die bestehende Gasinfrastruktur genutzt werden kann.

- **Ammoniak (NH<sub>3</sub>):** Ammoniak wird bisher vor allem lokal produziert und als Produkt der chemischen und Düngemittelindustrie genutzt. Zur Nutzung als Energieträger gibt es Forschungsprojekte. Sowohl für die direkte Nutzung mit Hilfe der Ammoniak-Brennstoffzelle (z.B. in der Schifffahrt) als auch für eine mögliche katalytische Wasserstofffreisetzung aus Ammoniak.

- **Synthetische Kraftstoffe:** Da synthetische Kraftstoffe in Beimischungsquoten konventionelle Kraftstoffe schrittweise ersetzen sollen, wird für Transport und Speicherung keine zusätzliche Infrastruktur benötigt.

## 2.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Die kommerzielle Nutzung von Wasserstoffinfrastruktur steht noch am Anfang. Deswegen beschränkt sich die Wissensbasis dazu auf Demonstrationsprojekte und auf geschätzte und geplante Investitionen in Wasserstofftransportwege und -speicher. So werden beispielsweise in Deutschland 120 km existierende Erdgasleitungen umgerüstet, um Raffinerien in Lingen und Gelsenkirchen mit gasförmigem Wasserstoff aus Elektrolyseuren im Emsland zu versorgen (Projekt: GET H<sub>2</sub> Nukleus). Ein weiteres Beispiel ist die Bindung von grünem Wasserstoff aus der Nordsee an LOHC mit Hydrieranlagen auf Helgoland, damit das transportfähige LOHC in den Hamburger Hafen verschifft werden kann (Projekt: HELGOLAND und H<sub>2</sub>Mare bis 2025).

Neben den Demonstrationsprojekten sind Prognosen, Modelle und Roadmaps wichtige Datenquellen für die Infrastrukturentwicklung am Anfang einer Wasserstoffwirtschaft. So werden die Investitionen in ein europäisches Wasserstoff-Transportnetz auf ca. 40 Mrd. € bis 2040 geschätzt. Damit wird dann der Umbau und Zubau von etwa 23.000 km Wasserstoffpipelines in Europa finanziert. Die Kosten für den Wasserstofftransport sollen dann zwischen 0,09-0,17 €/tkm (Gas-Pipeline) liegen (Gas for Climate, 2021).

Wichtige Datenquellen sind auch Studien zur Transportinfrastruktur (Ram et al., 2020) sowie nationale und internationale Roadmaps für die Wasserstoffwirtschaft. Ein entscheidender Teil der Wasserstoffinfrastruktur kann auch durch die Umwidmung bestehender Gaspipelines abgedeckt werden. Die Daten für die nationalen Ausbaumaßnahmen werden dazu im Netzentwicklungsplan Gas der Bundesnetzagentur festgehalten. Weitere wichtige nationale und internationale Datenquellen und Organisationen sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

| Datenquelle und Organisation  | Beschreibung   | Regionale Abdeckung   | Stand und Modus der Aktualisierung |
|---|--|-----------------------|------------------------------------|
| Hydrogen Project Database – IEA (Erstellt durch das IEA TCP)                              | Umfassende Datenbank zu Projekten des Transports und der Speicherung von Wasserstoff   | Weltweit              | Halbjährige Aktualisierung         |
| Hydrogen Council – Hydrogen Insights (Erstellt durch McKinsey)                            | Jährlicher Bericht zur globalen Entwicklung der H2-Transportleistungen   | Weltweit              | Jährliche Aktualisierung           |
| Bundesnetzagentur – Netzentwicklungsplan (NEP) Gas 2020-2030                              | Informationen zur Entwicklung der deutschen Fernleitungsnetze mit der Sektion Wasserstoff  | Deutschland           | Kontinuierliche Aktualisierung     |
| Gas for Climate Initiative – European Hydrogen Backbone <sup>3</sup>                      | Initiative besteht aus 23 europäischen Gasinfrastrukturunternehmen, die zusammenarbeiten, um eine europaweite Wasserstoff-Transportinfrastruktur zu planen.                            | Europa                | Kontinuierliche Aktualisierung     |
| H2-international – E-Journal für Hydrogen und Fuel Cells <sup>4</sup>                     | H2-international Blog und H2-international enthalten Artikel, die auch in der deutschen Zeitschrift 2H2 veröffentlicht werden. Neben deutschen H2-Aktivitäten auch weltweite Beiträge. | Weltweit, Deutschland | Kontinuierliche Aktualisierung     |
| H2 MOBILITY Deutschland GmbH <sup>5</sup>   | Unternehmen mit dem Ziel des flächendeckenden Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland. Berichtet über geplante und betriebene Wasserstofftankstellen in Europa.          | Europa                | Kontinuierliche Aktualisierung     |
| H2 Stations Map <sup>6</sup> (Erstellt durch die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)) | LBST betreibt seit 2005 die Datenbank h2stations.org zu aktuellen Informationen zu Wasserstofftankstellen weltweit   | Weltweit              | Kontinuierliche Aktualisierung     |

Tabelle 5: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Wasserstoffinfrastruktur

## 2.3 Monitoringkonzept

Für ein systematisches Monitoring der globalen Transport- und Speicherinfrastruktur für Wasserstoff sollte eine regelmäßige Erhebung der Größe, Kapazität und Leistung der weltweiten Wasserstoff-Transportinfrastruktur, sowie zugehöriger Investitionen, erfolgen. Die entsprechenden Indikatoren sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Ein zentraler Indikator für die überregionale Verteilung von Wasserstoff ist die Größe des Transportnetzes. Dies umfasst sowohl die Nutzung bestehender Gas-Pipelines als auch den Neubau von Wasserstoff-Pipelines für die Ergänzung bei unzureichender Gasinfrastruktur. Die Größe des Transportnetzes zeigt die Potenziale von Wasserstoffimport- und Export und einer besseren Verteilung von Erzeugung und Verbrauch. Dies ist für die Kosteneffizienz der Wasserstoffnutzung und für die Versorgungssicherheit Deutschlands und der Europäischen Union zentral. Der Indikator Transportleistung, überwiegend über die maritime Schifffahrt, soll das Pipelinennetz ergänzen. Wasserstoff soll auf dem Seeweg vor allem kosteneffizienter importiert werden. Um prospektiv den Umfang des Transportnetzes abzuschätzen, werden auch die geplanten Investitionskosten für Wasserstoff-Pipelines betrachtet (siehe Tabelle 6).

<sup>3</sup> Verfügbar unter: <https://www.gasforclimate2050.eu>.

<sup>4</sup> Verfügbar unter: <https://www.h2-international.com>.

<sup>5</sup> Verfügbar unter: <https://h2.live>.

<sup>6</sup> Verfügbar unter: <https://www.h2stations.org>.

Die Größe der Speicherkapazität wirkt sich auf die Versorgungssicherheit und die Möglichkeit der Pufferung saisonaler Erzeugungs- und Verbrauchsvolatilitäten aus, insbesondere in Relation zum Wasserstoffumsatz der betrachteten Regionen. Die Anzahl der Wasserstofftankstellen (Stand 2020: 87 Tankstellen in Deutschland) zeigen die Nutzungspotentiale von Wasserstoff im Sektor Verkehr, insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge und sind Voraussetzung für die Entwicklung einer klimafreundlichen Logistik auf der Basis von Wasserstoff.

Die Indikatoren (s. Tabelle 6) können dabei nach den Transport- und Speicherprodukten (H<sub>2</sub>-gasförmig, H<sub>2</sub>-flüssig, LOHC, ggf. auch Ammoniak und synthetische Brennstoffe) und den Transportmodi (Beimischung zu Brennstoffen, Pipeline, Schiff, ggf. auch Straße und Schiene) aggregiert werden. Für die Regionalisierung bieten sich die Aggregationsstufen: globale, Wirtschaftsraum- und Länderebene an. Die Daten für das Monitoring der Wasserstoffinfrastruktur sind ausreichend und aktuell verfügbar. Dennoch gibt es insbesondere für das globale Monitoring von Nicht-EU-Staaten Datenlücken zur geplanten Infrastruktur. Hier müssen die Daten durch Recherchearbeit zu Infrastruktur-Projekten in jährlicher Aktualisierung für bestimmte Schlüsselländer (z.B. Maghreb-Staaten) ergänzt werden. Auch die Erfassung der H<sub>2</sub>-Transportleistung durch den Schiffs- und Schienenverkehr ist bislang unzureichend. Zusammen mit der Mobility and Transport Abteilung der Europäischen Kommission könnten die Datenlücke zu den Transportleistungen für den Wasserstofftransport in Europa durch eine wasserstoffspezifische Erfassung der Transportdaten geschlossen werden.

| Indikator                                | Einheit/<br>Benchmark                        | Datenquelle   | Zweck   |
|--|--|---|---|
| Größe des Transportnetzes                | km   | Hydrogen Council (global), European Hydrogen Backbone (Europa), NEP Gas (Deutschland) | Pipelines in Planung, Nutzung von Gaspipelines        |
| Transportleistung                        | tH <sub>2</sub> km                           | IEA project database (global),  | Transport über Schiff, Straße und Schiene             |
| Geplante Investitionen in Transportnetze | €  | Hydrogen Council (global), European Hydrogen Backbone (Europa), NEP Gas (Deutschland) | Prospektiv für die Umrüstung und Neubau von Pipelines |
| Gesamt-Transportkapazität                | tH <sub>2</sub> /a oder TWhH <sub>2</sub> /a | Hydrogen Council (global), European Hydrogen Backbone (Europa), NEP Gas (Deutschland) | Über Heizwert auch in Energieeinheit darstellbar      |
| Transportkosten                          | €/tH <sub>2</sub> km                         | European Hydrogen Backbone (global)   | Effiziente Verteilung und Importpotenziale            |
| Hydrier-/Dehydrierkapazitäten            | tH <sub>2</sub> /a                           | Hydrogenious LOHC Technologies GmbH (Deutschland, weltweit)                           | Zur Erfassung des LOHC-Pfads                          |
| Gesamt-Speicherkapazität                 | tH <sub>2</sub> oder TWhH <sub>2</sub>       | H <sub>2</sub> -international (global, Deutschland)                                   | Beinhaltet überwiegend Salzkavernen-Speicher          |
| Anzahl Wasserstoff-Tankstellen           | Anzahl                                       | H <sub>2</sub> Stations Map (global), H <sub>2</sub> MOBILITY (Europa)                | Betankung von Brennstoffzellen-LKW (und PKW)          |

**Tabelle 6: Indikatoren für das Monitoring der globalen Transport- und Speicherinfrastruktur für Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte**

---

## 3. Politik und Regulierung

---

### 3.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Insbesondere in der Anfangsphase des Aufbaus einer globalen Wasserstoffwirtschaft werden Marktentwicklungen im Wasserstoffsektor, wie in anderen grünen Zukunftsmärkten, von politischen Entwicklungen geprägt sein. Anders als in rein marktgetriebenen Zukunftsbranchen und -technologiefeldern ist die Entwicklung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff ohne politische Unterstützung in der Anfangsphase der Marktentwicklung nicht zu erwarten. Während langfristig ein ausreichend hoher CO<sub>2</sub> Preis die Nachfrage nach klimaneutralem Wasserstoff herstellen könnte, wird der europäische Emissionshandel sowie der neu eingeführte CO<sub>2</sub> Preis in Deutschland diese Wirkung im kommenden Jahrzehnt nicht entfalten können.

Folglich haben in dieser Phase des Marktaufbaus zusätzliche politische Interventionen in Deutschland, der EU und in weiteren internationalen Vorreiterländern einen wesentlichen Einfluss auf Marktentwicklungen und damit auch auf die Entwicklung einer globalen Wasserstoffindustrie. Dieser Einfluss wird durch Fördermaßnahmen auf der Angebotsseite, bspw. zur Förderung von Forschung und Entwicklung, Demonstrationsprojekten und Transportinfrastruktur, verstärkt. Es ist das Zusammenspiel von Politik, Markt und Industrieentwicklung in den zentralen Vorreiterländern, die die Wettbewerbsfähigkeit unterschiedlicher technischer Lösungen sowie Anbietern dieser Lösungen bestimmen. Ebenso wichtig für die Entwicklung einer globalen Wasserstoffwirtschaft ist die Entwicklung politischer und regulativer Rahmenbedingungen in Ländern mit hohem Potenzial für den Export von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten. Diese haben einen wichtigen Einfluss auf Investitionen in die Herstellung von klimafreundlichem Wasserstoff.

Um einen Überblick über Politik und Regulierung in wichtigen Vorreiterländern und potenziellen Exportländern zu erhalten, sollte ein Monitoring sowohl einen qualitativen als auch einen quantitativen Überblick über die wichtigsten Entwicklungen geben. Während der qualitative Teil einen Gesamtüberblick über Entwicklungen in den wichtigsten Ländern vermitteln sollte, sollte der quantitative Teil einen globalen Überblick sowie einen systematischen Vergleich entlang relevanter Dimensionen ermöglichen. Letzteres sollte die Einschätzung wichtiger politischer Einflüsse auf die globale Marktentwicklungen ermöglichen sowie die Stärken und Schwächen bzw. Schwerpunkte der jeweiligen Länder verdeutlichen. Entsprechende Vergleiche können wichtige Impulse für Politiklernen und damit für die Weiterentwicklung der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik geben.

### 3.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Mehr als 20 Länder und subnationale Akteure verfügen heute bereits über eigene Wasserstoffstrategien. Sie sollen die Wasserstoffproduktion anregen und/oder ein Umfeld für Wasserstoffimporte und -exporte schaffen. Auch die Zahl bi- und trilateraler Abkommen zwischen Ländern mit Wasserstoff-Exportpotenzial und solchen mit Importbedarf nimmt zu. Der Weltenergieat stellt in einer 2020 erschienenen Studie fest, dass bestehende Wasserstoffstrategien zwar politische Ziele und Maßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung enthalten. Es fehlten jedoch Politiken zur Förderung der Kommerzialisierung von Wasserstofftechnologien (Weltenergieat, 2020).

Mehr und mehr Think Tanks, Forschungsinstitute und internationale Institutionen beschäftigen sich mit diesen Wasserstoffstrategien sowie den notwendigen politischen und regulativen Rahmenbedingungen für den Aufbau einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Die Herausforderungen, die es zu meistern gilt, sind dabei vielfältig: die Politik müsse Skaleneffekte erzeugen damit die Preise für Wasserstofftechnologien sinken und Wasserstoff in der Breite Anwendung finden könne (IEA, 2019); die Geschwindigkeit, in der Lade- und Transportinfrastruktur entstehe, müsse beschleunigt werden (IEA, 2019); regulative Hindernisse müssten beseitigt werden (ESYS, BDI, & dena, 2019; FNB Gas, 2020; IEA, 2019); Investitionsrisiken müssten gemindert werden; die Stromerzeugung

durch erneuerbare Energien müsse weltweit massiv ausgebaut werden (Bloomberg NEF, 2020); die CCS müsse breitere Anwendung finden (IEA, 2019). Angesichts dieser Herausforderungen werden in der Literatur politische und regulatorische Lösungen für verschiedene Sektoren und Anwendungsfelder diskutiert.

In all diesen Feldern entsteht weltweit bereits eine wachsende Zahl von Politikinterventionen und Regulierung. Verschiedene Akteure haben begonnen, die entsprechenden Daten dazu zu erheben und in Datenbanken oder Visualisierungsformaten zu sammeln, wie die folgende Tabelle 7 zeigt. Dabei handelt es sich teilweise um (vorerst) einmalige Erhebungen und Erhebungen mit regionaler Eingrenzung.

| Datenquelle und Organisation  | Beschreibung  | Regionale Abdeckung   | Stand und Modus der Aktualisierung      |
|---|---|-----------------------|---|
| FCHO – Database of EU and National Hydrogen Policies, Fuel Cells and Hydrogen Observatory | Policy Datenbank zu den Bereichen Brennstoffzellen, Tankstellen, Verteilung und industrielle Nutzung (basiert auf Berichten von Länderexpert*innen im Netzwerk durch online Fragebogen) | EU, weltweit          | Jährliche Aktualisierung                |
| HyLaw Datenbank (von Hydrogen Europe koordiniert)   | Wasserstoff Gesetze und Entfernung von gesetzlichen Hindernissen für Entwicklung von Brennstoffzellen und Wasserstoffanwendungen  | 18 Europäische Länder | Aktualisiert bis 2020                   |
| IEA Policy Database   | Enthält Politik, Projekte, Aktivitäten, Roadmaps, Veröffentlichungen  | Weltweit              | Stand 2019, unklar ob aktualisiert wird |
| Weltenergieat   | Virtuelle Karten zu Wasserstoff-Aktivitäten und -partnerschaften  | Weltweit              | Permanente Aktualisierung               |

Tabelle 7: Bestehende Datenquellen für das Monitoring der Politik und Regulierung

### 3.3 Monitoringkonzept

Für das Monitoring von Politik und Regulierung kann für einen Großteil relevanter Länder auf die oben genannten Datenquellen zurückgegriffen werden. Darüber hinaus führt das IASS Potsdam im Rahmen des BMBF-finanzierten HyPat-Projektes<sup>7</sup> zusätzliche Datenerhebungen zur Ergänzung und Aufbereitung dieser Daten für eine vergleichende Analyse zentraler Länder der globalen Wasserstoffwirtschaft durch. Dies bildet eine wichtige Ausgangsbasis für das Monitoring. Eine Erweiterung und Fortführung dieser Datenerhebung und -aufbereitung über die Laufzeit des HyPat-Projektes hinaus wäre im Rahmen der Energiepartnerschaften der Bundesregierung denkbar. Auf diese Weise könnte eine zunehmend umfassende und aktualisierte Datenbasis für das Monitoring geschaffen werden.

Zur Nutzung verfügbarer Daten für den systematischen Vergleich wichtiger Länder der Wasserstoffwirtschaft schlagen wir eine Kombination qualitativer und quantitativer Auswertungsmethoden vor. Dies ermöglicht eine Darstellung von Schwerpunkten sowie Stärken und Schwächen der so erfassten Länder. Das ist insbesondere für wichtige Vorreiterländer der globalen Wasserstoffwirtschaft von Bedeutung.

### Regelmäßige quantitative und qualitative Auswertung der Politikziele und -instrumente

Für die quantitative Auswertung schlagen wir eine Kodierung vorhandener Politikzielen und -instrumenten nach einer Reihe von Analysekategorien vor. Dadurch können vorhandene Politikziele sowie die Anzahl vorhandener Maßnahmen in definierten Bereichen erfasst werden. Eine quantitative Auswertung ermöglicht eine Visualisierung der Instrumentenmixe in den unterschiedlichen Ländern. Auf diese Weise können Länderüberblicke sowie

<sup>7</sup> Siehe hierzu: [https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/transport\\_import](https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/transport_import).

Ländervergleiche zu ausgewählten Kategorien durchgeführt werden. Ein ähnlicher Ansatz für den Bereich der Innovationspolitik verfolgt der Science, Technology and Innovation Policy (STIP) Compass<sup>8</sup>, ein gemeinsames Projekt von Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit (OECD) und der Europäischen Kommission. Für eine entsprechende Analyse für die Politik und Regulierung im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft schlagen wir zunächst folgende Kategorien vor (siehe Tabelle 8).

| <b>Analysekategorien – Politikziele</b>  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachfrage</li> <li>▪ Erzeugung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Methanreformierung mit CCS</li> <li>▪ Elektrolyse</li> <li>▪ Methanpyrolyse</li> </ul> </li> <li>▪ Import</li> <li>▪ Export</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erzeugung von Folgeprodukten</li> <li>▪ Anwendung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Industrie</li> <li>▪ Transport</li> <li>▪ Wärme</li> <li>▪ Speicher</li> </ul> </li> <li>▪ Industrie und Innovation</li> </ul>  |
| <b>Analysekategorien – Politikinstrumente</b>  |   |
| <i>... nach Teilbereichen der Wasserstoffwirtschaft</i>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erzeugung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elektrolyse                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Allgemein</li> <li>▪ PEM</li> <li>▪ Alkali</li> <li>▪ SOEC</li> </ul> </li> <li>▪ Methanreformierung mit CCS</li> <li>▪ Methanpyrolyse</li> </ul> </li> <li>▪ Erzeugung von Folgeprodukten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Allgemein</li> <li>▪ Methanol</li> <li>▪ Fischer-Tropsch</li> <li>▪ Synthetisches Methan</li> <li>▪ LOHC</li> </ul> </li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anwendung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transport                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automobil</li> <li>▪ Bus</li> <li>▪ Bahn</li> <li>▪ LKW</li> <li>▪ Luftverkehr</li> <li>▪ Seefahrt</li> </ul> </li> <li>▪ Industrie                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stahl</li> <li>▪ Zement</li> <li>▪ Chemie</li> </ul> </li> <li>▪ Wärme</li> </ul> </li> <li>▪ Speicher</li> </ul> |
| <i>...nach Instrumententypen</i>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Angebotsförderung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ F&amp;E Förderung                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Steuerliche Anreize</li> <li>▪ Zuwendungen</li> <li>▪ Andere Instrumente</li> </ul> </li> <li>▪ Investitionsförderung (Erzeugung)                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Steuerliche Anreize</li> <li>▪ Zuwendungen</li> <li>▪ Andere Finanzierungsinstrumente, bspw. vergünstigte Kredite</li> </ul> </li> <li>▪ Gründungsförderung</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachfrageförderung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CO2 Bepreisung</li> <li>▪ Steuerliche Anreize</li> <li>▪ Ausschreibungen / Einspeisevergütungen</li> <li>▪ Regulative Instrumente, bspw. Quoten</li> <li>▪ Öffentliche Beschaffung</li> </ul> </li> <li>▪ Bildung und Information</li> <li>▪ Freiwillige Vereinbarungen</li> <li>▪ Netzwerk-/Clusterförderung</li> <li>▪ Internationale Initiativen</li> </ul>   |

**Tabelle 8: Analysekategorien für das Monitoring von Politikzielen und -instrumenten**

Eine Weiterentwicklung und Validierung der Kategorien findet unter Einbindung von Praxisakteuren im Rahmen des HyPat-Projektes statt. Neben einer Darstellung in Form jährlicher Monitoringberichte wäre eine web-basierte Visualisierung der Ergebnisse in Form von Länder-Dashboards (siehe STIP Compass) denkbar. Die quantitative Auswertung sollte zudem durch eine regelmäßige qualitative Erhebung der neuesten Politikentwicklungen ergänzt

<sup>8</sup> Siehe hierzu: <https://stip.oecd.org/>.

werden. Dabei könnte der Fokus auf die Analyse wichtiger Vorreiterländer aber auch ausgewählter Themen, wie bspw. Auktionsmechanismen und andere Anreizsystem für die Markteinführung von Wasserstoff oder die Verankerung von Klima- und Nachhaltigkeitsaspekten im Rahmen der Förderpolitik.

### Regulierung von strombasiertem und klimaneutralem Wasserstoff

Neben dem Monitoring förderpolitischer Maßnahmen spielen Regulierungen im Bereich Transport, Sicherheit und Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle für die Entwicklung einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Insbesondere Bedingungen für die Förderung von strombasiertem und klimafreundlichem Wasserstoff und die zugrundeliegenden Definitionen können wichtige Impulse für landespezifische Marktentwicklungen geben. Vorgaben in Bezug auf Aspekte wie Additionalität erneuerbarer Stromerzeugung und CO<sub>2</sub> Emissionen haben wichtigen Einfluss auf Investitionen in unterschiedliche Technologien und Geschäftsmodelle. Aus diesem Grunde sollte das Monitoring auch einen Überblick zu diesen Vorgaben schaffen. Dies könnte in einer Initialerhebung qualitativ erhoben und dann regelmäßig aktualisiert werden. Weitere Aspekte für ein gezieltes Monitoring könnten im Rahmen des Monitoring-Prozess unter Einbezug von Praxisakteuren identifiziert werden.

---

## 4. Qualitätsinfrastruktur (einschließlich Standardisierung)

---

### 4.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Laut der nationalen Wasserstoffstrategie (Bundesregierung, 2020) soll die Qualitätsinfrastruktur für Wasserstoffherzeugung, -transport, -speicherung und -verwendung weiter ausgebaut werden, um das Vertrauen in Wasserstofftechnologien zu schaffen und zu sichern. Durch die Eigenschaften von Wasserstoff ist eine verlässliche Qualitätsinfrastruktur für die Entwicklung und vor allem zur Überwachung von Anlagen zur Erzeugung, Transport, Speicherung und Verwendung von Wasserstoff essenziell. Hierfür spielen die Metrologie und physikalisch-chemische Sicherheitstechnik eine elementare Rolle, vor allem um das Vertrauen und damit die Nutzerakzeptanz der Wasserstofftechnologie zu stärken. Darüber hinaus spielt die Qualitätsinfrastruktur eine wichtige Rolle, um Vorteile in Forschung und Entwicklung schließlich auch in internationale Wettbewerbsfähigkeit umzusetzen. Mit dem Einfluss auf internationale Standards ist es möglich, die globale Qualitätsinfrastruktur für Wasserstoff zu beeinflussen und damit nicht nur nationale ökonomische Interessen, sondern auch nationale Überzeugungen hinsichtlich einer nachhaltigen globalen Wasserstoffstrategie umzusetzen.

Konkret bedeutet der Aufbau einer Qualitätsinfrastruktur, dass ein Konsens zu Messmethoden für unterschiedliche Aspekte einer Wasserstoffwirtschaft gefunden werden muss. Dieser schlägt sich zunächst in Normen und Standards, idealerweise auf internationaler Ebene, nieder und sollte dem aktuellen Stand in Wissenschaft und Forschung entsprechen. Diese müssen dann in der Praxis umgesetzt werden bzw. eventuell auch Eingang in die jeweiligen nationalen Regulierungen finden. Die Qualitätsinfrastruktur stellt damit die Schnittstelle zwischen Forschungs- und Innovationsaktivitäten, Industrie und den Wertschöpfungsketten sowie Politik und Regulierung dar.

Zentrale Fragestellungen richten sich auf die Entwicklung der noch begrenzt existierenden internationalen Standards im Bereich Wasserstoff. Sie stellen ein wesentliches Element der technischen Infrastruktur dar, die u.a. auch für den Transport benötigt wird und somit Auswirkungen auf die zukünftigen Handelsströme von Wasserstoff haben wird. Hier schließt sich nicht nur die Frage an, in welchen Bereichen Standards erarbeitet werden, sondern wer darauf Einfluss nimmt (Blind & von Laer, im Erscheinen). Hier ist zu prüfen, ob Standards im Bereich Wasserstoff auch eine Relevanz für die wirtschaftliche und technologische Souveränität Deutschlands hat (siehe Teil C, Abschnitt 2). Parallel dazu gilt es die Entwicklungen der Metrologie im Bereich des Wasserstoffes zu verfolgen, denn ein relevanter Anteil der Standards baut auf die Entwicklungen in der Messtechnik auf.

Sowohl auf Basis von Standards als auch der Messtechnologien können dann Zertifizierungsprogramme aufgesetzt werden, die unter anderem die Anforderungen der Nachhaltigkeit an den zu produzierenden und zu handelnden Wasserstoff kodifizieren und letztlich überprüfbar machen. Zertifizierungen haben aber auch einen signifikanten Einfluss auf Handelsströme und internationale Direktinvestitionen (Clougherty & Grajek, 2008). Die Akkreditierung kann dazu beitragen, die Qualität der Zertifizierungen als auch der Zertifizierungsinstitute zu sichern und damit Export- und Importströme beeinflussen (Blind, Mangelsdorf, & Pohlisch, 2018). Denn zu Unrecht ausgegebene Zertifikate können zu Unfällen führen und dann nachhaltig das Vertrauen in die Wasserstofftechnologie erschüttern. Hierfür ist nicht nur die Akkreditierung zur Qualitätssicherung der Zertifizierungsinstitute verantwortlich, sondern auch die Marktüberwachung, welche somit eine Schnittstelle zur Regulierung darstellt. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob die dafür zuständigen Institutionen etabliert wurden und letztlich auch funktionstüchtig sind.

## 4.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Detaillierte Untersuchungen zur Existenz und zur Funktionsfähigkeit der Qualitätsinfrastruktur im Bereich Wasserstoff liegen noch nicht vor. Auktor, Altenburg, and Stamm (2020) analysieren allgemein die Rolle der Qualitätsinfrastruktur für den Übergang in einer Green Economy in Entwicklungsländern, ohne explizit auf das Thema Wasserstoff einzugehen. Ihre Analyse stellt dennoch einen Ausgangspunkt für die potenzielle Rolle der Qualitätsinfrastruktur im Wasserstoffsektor dar. Informationen zu internationalen Standards im Wasserstoffbereich werden auf einer Website der U.S.-basierten Fuel Cell and Hydrogen Energy Association<sup>9</sup> sowie auf den Seiten von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) gebündelt dargestellt. In der Datenbank des FCHO werden auch zahlreiche internationale und europäische Standards mit Relevanz für Wasserstoff nach Kategorien wie Transport, Infrastruktur, Erzeugung, aber auch Nachfrage gelistet. Inzwischen wird eine Zertifizierung zu grünem Wasserstoff angeboten.

Über ein WebMining ist es möglich, die Verbreitung internationaler Standards zu beobachten. Jedoch gibt es keine Referenzen zur Grundgesamtheit an Unternehmenswebseiten. Diese Informationen liegen bisher nur für Deutschland vor, welche dann für die Analyse der Verbreitung eines IT-Sicherheitsmanagement-Standards genutzt werden konnte (Mirtsch, Kinne, & Blind, 2021). Es gibt laut Datenbank der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) zahlreiche Konformitätsbewertungsstellen, die sich auch z.B. bzgl. der Messung der Verschmutzung von Wasserstoff haben akkreditieren lassen. Hier handelt es sich bzgl. Zertifizierung und Akkreditierung aber nur um nationale Datenbanken. Die internationale Metrologiedatenbank<sup>10</sup> enthält Informationen zu den international anerkannten Kalibrierungs- und Messkapazitäten der Mitgliedsinstitutionen bzw. Mitgliedsstaaten, die auch das Thema Wasserstoff adressieren. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die genannten Datenquellen.

| Datenquelle und Organisation                                     | Beschreibung  | Regionale Abdeckung | Stand und Modus der Aktualisierung |
|--|---|---------------------|------------------------------------|
| ISO/IEC Normenkatalog  | Internationale Standards  | Weltweit            | regelmäßige Aktualisierung         |
| FCHO – Standards Database  | Internationale und europäische Standards  | EU                  | regelmäßige Aktualisierung         |
| Fuel Cells and Hydrogen Energy Association (FCHEA)               | Internationale, europäische und ausgewählte nationale Standards                   | Weltweit (nahezu)   | regelmäßige Aktualisierung         |
| Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen (OIML) | Internationale Messstandards  | Weltweit            | regelmäßige Aktualisierung         |
| ISO/IEC Normenkatalog – Referenzen                               | Wissenschaftliche Referenzen zitiert in internationalen Standards                 | Global              | regelmäßige Aktualisierung         |
| Internationale Metrologiedatenbank (KCDB)                        | Informationen zu den international anerkannten Kalibrierungs- und Messkapazitäten | Nahezu global       | regelmäßige Aktualisierung         |

Tabelle 9: Datenquellen für das Monitoring der Qualitätsinfrastruktur

## 4.3 Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept bzgl. Qualitätsinfrastruktur, einschließlich Standardisierung, basiert auf einer Kombination aus qualitativen und quantitativen Elementen. Dafür werden im Folgenden die relevanten Aspekte und damit verbundenen Datenquellen für das Monitoring einer globalen Qualitätsinfrastruktur vorgestellt. Tabelle 10 fasst die entsprechenden Indikatoren und Datenquellen zusammen.

<sup>9</sup> Siehe hierzu: <http://www.fuelcellstandards.com/>.

<sup>10</sup> Siehe hierzu: <https://www.bipm.org/kcdb/>.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark   | Datenquelle                               | Zweck  |
|--|---|---|--|
| Internationale Standards   | Anzahl insgesamt und in ausgewählten Technologie- und Anwendungsfeldern   | ISO/IEC                                   | Entwicklung der globalen Standardisierungslandschaft als Basis für den Welthandel von Wasserstoff und dafür notwendige Technologien  |
| Nationale Standards  | Anzahl in führenden Ländern, insgesamt und in ausgewählten Technologie- und Anwendungsfeldern   | FCHEA                                     | Entwicklung und Bestand an nationalen Standards als Basis für die nationale Wettbewerbsfähigkeit   |
| Standardessentielle Publikationen  | Anzahl (absolut und relativ zu nationalen Publikationen im Bereich Wasserstoff) in führenden Ländern), insgesamt und in ausgewählten Technologie- und Anwendungsfeldern | ISO (ev. IEC)                             | Messung des Einflusses der nationalen Forschung auf internationale Standards, welche langfristig die nationale Wettbewerbsfähigkeit beeinflusst  |
| Zertifizierung   | Anzahl der vergebenen Zertifikate in führenden Ländern / Regionale Verteilung der zertifizierten Unternehmen  | WebMining oder Zertifizierungsstellen     | Messung der Umsetzung zertifizierbarer Standards, die sowohl für Exporte als auch Importe relevant sind  |
| Akkreditierung   | Anzahl akkreditierter Konformitätsbewertungsstellen in führenden Ländern  | Nationale Akkreditierungsstellen          | Messung der Qualität der nationalen Zertifizierungsstellen, die sowohl für Exporte und Importe relevant ist  |
| Leistungsfähigkeit der nationalen international anerkannten Kalibrierungs- und Messkapazitäten | Verbreitungsgrad der Messkapazitäten, (Stoffmengenanteil in mol/mol sowie relative erweiterte Unsicherheit in % für Referenzmaterial Wasserstoff)                       | Internationale Metrologiedatenbank (KCDB) | Informationen zu den international anerkannten Kalibrierungs- und Messkapazitäten erlauben die Metrologie-Kapazität eines Landes zu bestimmen, welche auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit mitbestimmt |
| Marktüberwachung   | Nur qualitative Erhebung der Strukturen   | Nationale Regulierungsorganisationen      | Qualität der Umsetzung der auf Standards und Regelungen basierenden Vorgaben   |

Tabelle 10: Indikatoren für das Monitoring der globalen Qualitätsinfrastruktur

## Standardisierung und Standards

Die Analyse der Standards im Bereich Wasserstoff sollte sich grundsätzlich auf internationale Standards beziehen. Hier kann man sich an der International Classification of Standards (ICS) orientieren, die zum einen ein Klasse zu „Hydrogen technologies“ (ICS 27.075), aber auch zu „Industrial application of hydrogen (ICS 71.100.20) enthält. Die Inhalte der Standards können dann nach Anwendungs- und Themenfeldern kategorisiert werden.

Um den nationalen Einfluss auf die internationalen Standards zu bestimmen, werden die darin referenzierten Quellen analysiert. Hier handelt es sich zum einen um wissenschaftliche Publikationen (Blind, Pohlisch, & Rainville, 2019). Dadurch kann die wissenschaftliche Basis der Standards bestimmt und eine Verbindung zu den nationalen Forschungsaktivitäten hergestellt werden. Diese wissenschaftlichen Publikationen können auch nach Technologie- und Anwendungsfeldern differenziert werden. Eine erste Analyse zeigt, dass sie vor allem aus den Materialwissenschaften, der Metallurgie und der Chemie stammen (Ashari & Blind, i.E.). Ferner zeigt, deren Autorenschaft, welche Institutionen aus welchen Ländern vor allem Einfluss auf die internationale Standardisierung nehmen. Es wird in diesen internationalen Standards aber auch auf Dokumente von UN-Organisationen, der Europäischen

Union oder andere Institutionen verwiesen. Dadurch wird die Verbindung der Standards zum globalen regulativen Rahmen, oder möglicherweise zu nationalen Regulierungen, hergestellt. Schließlich können neben den Standards selbst auch die internationalen Standardisierungsprozesse im ISO/TC 197 Hydrogen technologies oder im TC 105 Fuel cell technologies verfolgt werden, um die beteiligten Länder zu erfassen.

### (Nachhaltigkeits-)Zertifizierung

Zertifizierungsprogramme haben häufig eher nationalen Charakter. Deshalb gilt es die national existierenden Zertifizierungsprogramme und ihre Anbieter mit Fokus auf die führenden Länder in Europa, Asien, Nordamerika, Australien zu identifizieren, anhand der inhaltlichen Ausrichtung (bspw. Nachhaltigkeit) zu kategorisieren und in Bezug zur vorhandenen Regulierung zu setzen. Im nächsten Schritt wäre die Anzahl der jeweils ausgestellten Zertifikate sowie die regionale Verteilung der zertifizierten Unternehmen zu erfassen. Schließlich kann auch der Zusammenhang zwischen Standards und Zertifizierungen analysiert und auf diesem Wege auch die Relevanz nationaler Forschungsaktivitäten auf dieser Ebene festgestellt werden.

### Akkreditierung, Metrologie und Marktüberwachung

Die Akkreditierungen zum Thema Wasserstoff müssen bisher national erfasst werden. Es gibt zwar die European Co-operation for Accreditation (EA) und das IAF International Accreditation Forum (IAF), aber dort gibt es bisher noch keine Informationen zu den Akkreditierungen im Bereich Wasserstoff. Dagegen enthält die internationale Metrologiedatenbank<sup>11</sup> Informationen zu den international anerkannten Kalibrierungs- und Messkapazitäten der Mitgliedsinstitutionen bzw. Mitgliedsstaaten, die auch das Thema Wasserstoff adressieren. Sie bilden die Basis für Messstandards, aber auch darauf aufbauende Zertifizierungen. Deshalb kann hier entsprechend ein globaler Überblick zu den nationalen Kapazitäten erstellt werden. Die Marktüberwachung ist wieder nur national erfassbar und in Deutschland sogar auf Ebene der Bundesländer angesiedelt. Da hier staatliche Stellen für eine einheitliche Marktüberwachung für europäisch harmonisierte und europäisch nicht harmonisierte Standards verantwortlich sind, muss hier in Abstimmung mit dem Regulierungsmonitoring vorgegangen werden.

<sup>11</sup> Siehe hierzu: <https://www.bipm.org/kcdb/>.

---

## 5. Forschung und Innovation

---

### 5.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Ein Monitoring von Forschung und Innovation soll Einblicke in die wichtigsten Aktivitäten und Entwicklungen sowie die Identifikation der wichtigsten Akteure und Institutionen auf dem Feld ermöglichen. Forschungs- und Innovationsaktivitäten sollen erfasst werden, um deren Ausmaß und Schwerpunkte sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern darzustellen. Denn sie sind letztlich die Basis für die nachfolgende wirtschaftliche Entwicklung der nationalen, aber auch der internationalen Wasserstoffwirtschaft. Informationen zum Umfang, aber auch zur inhaltlichen Ausrichtung der Forschungs- und Innovationsaktivitäten sind notwendig, um die nationale Position im internationalen Forschungs- und Innovationswettbewerb zu bestimmen. Konkret geht es darum, die international führenden Länder, aber auch Institutionen zu bestimmen. Im Sinne einer Benchmark-Analyse ist es das Ziel von diesen Akteuren zu lernen und die eigenen Forschungs- und Innovationsaktivitäten zu optimieren. Dazu gehört auch die Frage, mit welchen Ländern Forschungsk Kooperationen anzustreben wären.

### 5.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Die Forschungsaktivitäten zum Thema Wasserstoff haben eine langjährige Tradition. Bei den Forschungsausgaben haben Andreasen and Sovacool (2015) die Ausgaben der Energieforschung im Bereich Wasserstoff zwischen 2003 und 2012 erfasst und unter den OECD-Ländern die USA als führend, vor Japan, Frankreich, Kanada und Südkorea identifiziert. Deutschland folgt auf dem sechsten Rang. China ist als Nicht-OECD-Land folglich nicht erfasst. Einen umfassenderen Blick erlaubt die Analyse der wissenschaftlichen Publikationen, die seit den 1970er Jahren stetig gewachsen sind. Dabei sind die USA vor China und Japan führend. Deutschland folgt sowohl auf Basis der Datenbank Web of Science und Scopus auf dem vierten Platz. Die Datenbank der FCHO präsentiert auch wissenschaftliche Publikationen, wobei die Datenbasis nicht ganz transparent ist. Hiernach liegt 2019 China ganz vorne.

Bei den Patenten erfolgten die ersten internationalen Anmeldungen zum Ende des letzten Jahrhunderts (Sinigaglia, Freitag, Kreimeier, & Martins, 2019). Hier sind wiederum die USA vor Japan führend. Deutschland nimmt den dritten Platz ein. Offizielle Markenrecherchen zu Wasserstoff liegen nicht vor, jedoch zeigen Recherchen in der Markendatenbank der Weltorganisation für geistiges Eigentum (WIPO) eine führende Rolle der USA vor Südkorea. Inhaltlich konzentrieren sich die Patentanmeldungen auf die Wasserstoffproduktion, Behälter zum Wasserstofftransport und Brennstoffzellen. Das FCHO macht auch Patentdaten verfügbar, die insbesondere nach verschiedenen Typen von Brennstoffzellen differenziert sind.

Während für die Forschungsaktivitäten umfassende Daten sowohl für die Grundlagen- und die angewandte Forschung vorliegen, ist die Datenlage für die Innovationsaktivitäten und Erfolge sehr viel begrenzter. Hier müssen Unternehmensaktivitäten verfolgt und u.a. Pressemitteilungen über die Einführung neuer Produkte identifiziert werden.

Die etablierten Indikatoren für die Ermittlung der Forschungs- und Innovationsaktivitäten sind die schon oben genannten wissenschaftlichen Publikationen und Patente. Publikations- und Patentdaten verfügen über zwei Vorteile gegenüber allen anderen Indikatoren. Zum einen erlauben sie einen sehr frühzeitigen Einblick in die Entwicklung von Technologieführerschaft. Zum anderen können dadurch die Schwerpunkte einzelner Länder, aber auch Regionen innerhalb des Forschungs- und Innovationsgeschehens der Wasserstoffwirtschaft identifiziert werden. Damit lassen sich sowohl kleinteilige Segmente abbilden als auch eine globale Abdeckung aller Akteure und Organisationen erzielen.

Bei den Publikationen bieten sich die kommerziellen Web-of-Science- und Scopus-Datenbanken an. Patente können in der Datenbank des Europäischen Patentamtes, esp@cenet, recherchiert werden, weil dort alle Länder mit den geringsten Verzerrungen ihre Patente anmelden. Mit Hilfe dieser Indikatoren können die relative Performanz unterschiedlicher Volkswirtschaften insgesamt oder in ausgewählten Wissenschafts- oder Technologiefeldern verglichen und auch Änderungen im Zeitverlauf beobachtet werden. Dafür werden Indikatoren wie relative Publikations- oder Patentanteile oder Spezialisierungsindizes berechnet. Aus den Publikationen und Patentanmeldungen können auch die wichtigsten Innovatoren (Firmen) identifiziert werden. Diese Informationen können mit der Unternehmensdatenbank, die bereits über das FCHO verfügbar ist, gekoppelt werden.

Ferner können aus nationalen, aber vor allem aus der europäischen Markendatenbank des Amtes der Europäischen Union für geistiges Eigentum (EUIPO) und der internationalen Markendatenbank der WIPO Markenmeldungen im Bereich Wasserstoff recherchiert werden. Jedoch können hier vor allem auf Basis von Stichworten und manueller Durchsicht der Treffer eher qualitative Ergebnisse, wie die Identifikation der wichtigsten Unternehmen erwartet werden. Auch hier bietet sich eine Verbindung der Ergebnisse der FCHO-Unternehmensdatenbank an.

Schließlich kann durch die internationale Start-Up-Datenbank Crunchbase das Gründungsgeschehen im Bereich Wasserstoff im internationalen Vergleich erfasst werden, wenngleich die Datenbank ihren Schwerpunkt in den USA hat. Eine Übersicht über die Datenquellen bietet Tabelle 11.

| <b>Datenquelle und Organisation</b>                   | <b>Beschreibung</b>   | <b>Regionale Abdeckung</b>     | <b>Stand und Modus der Aktualisierung</b> |
|---|---|--------------------------------|---|
| SCOPUS (Elsevier)                                     | Wissenschaftliche Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzbänden                   | Weltweit                       | Tägliche Aktualisierung möglich           |
| Web of Science (Clarivate)                            | Wissenschaftliche Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzbänden                   | Weltweit                       | Tägliche Aktualisierung möglich           |
| Google Scholar (Google)                               | Wissenschaftliche Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften, Konferenzbände und sonstigen Quellen | Weltweit                       | Tägliche Aktualisierung möglich           |
| Patente (esp@net des EPO oder Datenbank der WIPO)     | Patentanmeldungen und -erteilungen  | Weltweit                       | Tägliche Aktualisierung möglich           |
| Markenanmeldungen (Datenbank der EUIPO oder der WIPO) | Markenregistrierungen   | Weltweit                       | Tägliche Aktualisierung möglich           |
| Start-Ups (Crunchbase)                                | Start-Ups   | Weltweit (mit Schwerpunkt USA) | Tägliche Aktualisierung möglich           |

**Tabelle 11: Datenquellen für das Monitoring der Qualitätsinfrastruktur**

### 5.3 Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept setzt an zwei Ebenen an. Es wird hierbei zwischen der Länder- und der Unternehmensebene unterschieden. Zum aktuellen Zeitpunkt bildet die Unternehmensdatenbank des FCHO die wichtigste Grundlage für den Aufbau eines kontinuierlichen Monitorings von Forschung und Innovation. Es sollte als Ausgangspunkt für zusätzliche Datenerhebungen dienen. Im Nachgang können diese Erhebungen im Rahmen des Monitorings in regelmäßigen Zeitabständen aktualisiert werden. Die regelmäßige Aktualisierung ermöglicht zum einen die kontinuierliche Verbesserung der Datenlage und zum anderen die Darstellung von Entwicklungstrends. Im Folgenden werden entsprechende Indikatoren und damit verbundene Datenerhebungen vorgeschlagen. Diese werden in Tabelle 12 zusammenfassend dargestellt:

| Indikator               | Einheit/<br>Benchmark   | Datenquelle  | Zweck  |
|-------------------------|---|--|--|
| Publikationen           | Publikation (absolut oder relativ zur Bevölkerung)                  | SCOPUS, WoS, (Google-Scholar)  | Identifikation von Technologietrends und -führerschaft |
| Patentanmeldungen       | Patente (absolut oder relativ zur Bevölkerung)                      | esp@cenet; WIPO  | Identifikation von Technologietrends und -führerschaft |
| Markenanmeldung         | Marken (absolut oder relativ zur Bevölkerung)                       | EUIPO; WIPO  | Identifikation innovativer Unternehmen                 |
| Unternehmensgründungen  | Start-Ups (absolut oder relativ zu BIP oder Anzahl der Unternehmen) | Crunchbase   | Identifikation von Start-Ups                           |
| Innovative Technologien | Fallbeispiele   | Informationen durch Publikationen, Patente, Marken und Start-Up-Datenbanken validiert durch Expert:innen | Identifikation spezieller Technologien                 |

Tabelle 12: Indikatoren für das Monitoring von Forschung und Innovation

## Regelmäßige Erhebung der globalen Forschungslandschaft im Wasserstoffsektor

Basierend auf den existierenden Literatur- und Patentdatenbanken werden sowohl die historischen Entwicklungen seit dem Jahr 2000 nachgezeichnet als auch jährlich die entsprechenden Daten erhoben. Diese können inhaltlich über Schlagworte oder IPC-Klassen<sup>12</sup> weiter differenziert werden. Diese Differenzierung kann mit den Anforderungen aus den anderen Dimensionen des Monitorings abgestimmt werden, da sowohl Publikationen als auch Patente sehr differenziert nach Themen, Akteuren und Regionen differenziert werden können. Hier bietet es sich auch an, wichtige Themenfelder, z. B. verschiedenen Brennstoffzellentechnologien analog zu Pinsky, Sabharwall, Hartvigsen, & O'Brien (2020), durch Expert:innen nach dem Technology-Readiness-Level bewerten zu lassen.

## Regelmäßige Erhebung der globalen Innovationslandschaft im Wasserstoffsektor (ggf. mit Fokus auf die führenden Länder in Europa, Asien, Nordamerika, Australien)

Basierend auf der Unternehmensdatenbank des FCHO werden unternehmensspezifische Publikations- und Patentanalysen durchgeführt. Dadurch kann zunächst ein Überblick über die Forschungs- und Innovationsaktivitäten von Firmen im Wasserstoffsektor generiert werden. Nachfolgend kann dann auch eine generelle Charakterisierung der Unternehmen nach Fokusaktivitäten vorgenommen werden. Darüber hinaus können die höchst zitierten Publikationen und Patente identifiziert werden. Diese haben mit einer hohen Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die zukünftige technologische Leistungsfähigkeit der Unternehmen, aber auch der entsprechenden Volkswirtschaften, die wiederum Auswirkungen auf Kostenentwicklung und damit Wettbewerbsfähigkeit haben kann. Ferner können die Markenanmeldungen auch rückwirkend in den europäischen bzw. internationalen Markendatenbanken und die Gründungen von Start-Ups mit Bezug zu Wasserstoff recherchiert werden. Die Rechercheergebnisse können u.U. zu einer Erweiterung der in der FCHO Datenbanken gelisteten Unternehmen beitragen.

<sup>12</sup> IPC steht für internationale Patentklassifikation.

## Regelmäßige Bewertung des globalen Innovationssystems im Wasserstoffsektor (ggf. mit Fokus auf die führenden Länder in Europa, Asien, Nordamerika, Australien)

Basierend auf den regelmäßigen quantitativen und qualitativen Erhebungen kann - eventuell alternierend - für die Innovationssysteme der führenden Länder angereichert um die institutionellen, regulativen und politischen Rahmenbedingungen eine Stärken- und Schwächenanalyse durchgeführt werden. Hier können auch Forschungsprojekte im Kontext Horizon 2020 und zukünftig Horizon Europe, die sich mit dem Thema Wasserstoff befassen, zumindest für die Mitgliedstaaten der EU erfasst werden. Hier gibt es eine Schnittstelle zum Monitoring staatlich finanzierter nationaler und supranationaler Forschungs- und Innovationsprogramme.

---

## 6. Industrie und Wertschöpfung

---

### 6.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Ein Monitoring von Industrie und Wertschöpfung soll zunächst Einblicke in die wichtigsten wirtschaftlichen Entwicklungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft geben. Damit kann allgemein überprüft werden, wie sich der wirtschaftliche Beitrag zur deutschen und europäischen Volkswirtschaft im Zeitverlauf entwickelt – ein wichtiger Erfolgsindikator für deutsche und europäische Förderpolitik. Dieser wirtschaftliche Beitrag kann zudem zu anderen wichtigen Ländern und Regionen ins Verhältnis gesetzt werden, und es können Stärken und Schwächen der deutschen und europäischen Wasserstoffwirtschaft identifiziert werden.

Darüber hinaus soll der wirtschaftliche Beitrag für unterschiedliche Teilbereiche der Wasserstoffwirtschaft ermittelt werden. Auf diese Weise kann überprüft werden, wie sich diese einzelnen Industriezweige sowie die Wettbewerbsposition der deutschen und europäischen Industrie darin entwickeln. Schließlich soll ein Monitoring kritischer Technologien und Ressourcen erfolgen, die mittel- bis langfristig als Grundlage für die Entwicklung von Wertschöpfungsketten notwendig sind. Erkenntnisse zu diesen Entwicklungstrends können als Wissensbasis für die Abschätzung zukünftiger Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wasserstoffindustrie und für die Entwicklung technologiespezifischer Fördermaßnahmen dienen.

### 6.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Die Entwicklung von Industrie und Wertschöpfungsketten im Rahmen der internationalen Wasserstoffwirtschaft steht noch am Anfang. Dementsprechend ist die Wissensbasis auf diesem Gebiet auch noch nicht sehr ausgeprägt. Die detaillierteste Analyse der Liefer- und Wertschöpfungsketten bisher wurde von E4Tech, im Auftrag des FCH JU, durchgeführt (E4Tech, 2019). Der Bericht zeichnet zunächst die Lieferketten unterschiedlicher Elektrolyse- und Brennstoffzellensysteme in Europa mit Hilfe von Expert\*innenbefragungen systematisch nach und unterteilt sie in Subsysteme, Komponenten und kritische Rohstoffe. Für kritische Elemente der Lieferketten wird die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen, mithilfe von Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT)-Analysen<sup>13</sup>, untersucht. Zur Untersuchung der gesamten Wertschöpfungskette werden daraufhin Szenarien für den Ausbau der globalen und europäischen Wasserstoffindustrie entwickelt und die Wertschöpfung für die einzelnen Komponenten ausgewählter Lieferketten bestimmt. In einem letzten Schritt werden sozio-ökonomische Wirkungen abgeschätzt. Die Industrieanalyse von E4Tech bleibt dennoch unvollständig. So wurden Lieferketten beispielsweise nur für westeuropäische Staaten untersucht, während Zulieferer aus Osteuropa nicht erfasst wurden. Außerdem wurden die Lieferketten nicht nach Herkunft der Unternehmen untersucht. Der Ansatz von E4Tech ist bisher jedoch die mit Abstand umfassendste Analyse der Liefer- und Wertschöpfungsketten im grünen Wasserstoffsektor, und dient als Ansatzpunkt für weitere Datenerhebung in Europa und international.

Weitere wichtige Studien wurden von der Nationalen Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) und vom NREL in den USA veröffentlicht. Die NOW-Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) skizziert den aktuellen Stand der deutschen Industrie zur Fertigung von Elektrolyseuren und geht der Frage nach, welche Herausforderungen beim Aufbau einer „Gigawatt-Elektrolyseindustrie“ in Deutschland bestehen. Es werden unter anderem kritische Komponenten identifiziert, die ggf. ein Hemmnis in dem Zusammenhang darstellen könnten. NREL hat die Lieferketten von PEM Elektrolyseuren untersucht und in einem hohen technologischen Detailgrad die Herstellungskosten einzelner Sub-Komponenten modelliert.

<sup>13</sup> SWOT-Analysen untersuchen Stärken, Schwächen, sowie Chancen und Risiken.

Zu den üblichen Indikatoren für die Ermittlung des wirtschaftlichen Beitrags und Performanz einzelner Industriezweige oder –sektoren gehören Indikatoren, wie Bruttowertschöpfung, Umsatz, Exporte und Importe, globale Markt- und Handelsanteile, Investitionen und Beschäftigung. Mit Hilfe dieser Indikatoren kann die relative Performanz unterschiedlicher Volkswirtschaften in ausgewählten Wirtschaftszweigen verglichen, und es können Änderungen im Zeitverlauf beobachtet werden. In etablierten Sektoren werden zur Erstellung dieser Indikatoren Handels- und Produktionsdaten eingesetzt. Diese werden grundsätzlich von internationalen Organisationen, wie UN, Weltbank, OECD oder Eurostat, zur Verfügung gestellt. International werden sie anhand des sogenannten Harmonized System (HS) klassifiziert. Die HS-Klassifikation umfasst über 5000 Güterpositionen und wird ca. alle 5 Jahre aktualisiert, zuletzt im Jahre 2017. Leider werden relevante Wasserstofftechnologien, wie Brennstoffzellen oder Elektrolyseure, in der aktuellen Klassifikation noch nicht gesondert erfasst. Daraus folgt, dass es noch nicht möglich ist, Entwicklungen mit Hilfe dieser standardisierten Daten abzubilden. Auch das detailliertere europäische System NACE (Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft) zur Klassifizierung wirtschaftlicher Aktivitäten bildet Wasserstofftechnologien nicht gesondert ab.

Folglich müssen Daten zur Überprüfung der relativen Performanz unterschiedlicher Industriestandorte im Wasserstoffsektor sowie in seinen unterschiedlichen Teilbereichen gesondert erhoben werden. Teilweise führen private Firmen solche Erhebungen durch und bieten Industriedaten zum Kauf an. Im Wasserstoffsektor sind auch diese Daten nur im begrenzten Maße verfügbar. Die umfassendste Datenquelle liefert aktuell der „Fuel Cell Industry Review“ von E4Tech, der seit 2014 verfügbar ist. Der Bericht enthält einen qualitativen Überblick über wichtige Industrieentwicklungen sowie quantitative Daten zu Produktion und Ausbau von Brennstoffzellen in den größten regionalen Märkten (Asien, Nordamerika, Europa). Seit 2018 werden darin auch Elektrolyseure berücksichtigt, allerdings lagen bis 2018 noch keine quantitativen Marktdaten vor. Die umfassendste Datenquelle bleibt damit bisher die 2019 veröffentlichte Studie im Auftrag des FCH JU (E4Tech, 2019).

Im Auftrag des FCH JU entwickelt E4Tech zudem eine Datenbank für das FCHO, um Marktdaten internationaler Unternehmen zu erheben. Ausgangspunkt ist eine Unternehmensdatenbank, die bereits über das FCHO verfügbar ist. Allerdings sind dort bisher ausschließlich europäische Unternehmen und darunter vorwiegend westeuropäische Unternehmen enthalten. Eine globale Abdeckung ist angestrebt. Dementsprechend wird auch die globale Erhebung von Marktdaten angestrebt. Ein Teil dieser Marktdaten soll in aggregierter Form über das FCHO öffentlich zugänglich sein. Eine Übersicht über die verfügbaren Datenquellen bietet Tabelle 13.

| <b>Datenquelle und Organisation</b> | <b>Beschreibung</b>   | <b>Regionale Abdeckung</b>   | <b>Stand und Modus der Aktualisierung</b> |
|-------------------------------------|-----------------------|--|---|
| FCHO – FCH JU und Hydrogen Europe   | Unternehmensdatenbank | Bisher Fokus auf Firmen in Westeuropa; kontinuierliche Ausweitung angestrebt | Kontinuierliche Aktualisierung            |

Tabelle 13: Ausgewählte Datenquellen für das Monitoring der Industrie und Wertschöpfung

### 6.3 Monitoringkonzept

Zum aktuellen Zeitpunkt bildet die Unternehmensdatenbank des FCHO die wichtigste Grundlage für den Aufbau eines kontinuierlichen Monitorings von Industrie und Wertschöpfung. Es sollte als Ausgangspunkt für zusätzliche Datenerhebungen dienen. Im Nachgang können diese Erhebungen im Rahmen des Monitorings in regelmäßigen Zeitabständen aktualisiert werden. Die regelmäßige Aktualisierung ermöglicht zum einen die kontinuierliche Verbesserung der Datenlage und zum anderen die Darstellung von Entwicklungstrends.

Folgende Datenerhebungen wären von Interesse:

### Regelmäßige Erhebung der globalen Unternehmenslandschaft im Wasserstoffsektor (ggf. mit Fokus auf die führenden Länder in Europa, Asien, Nordamerika, Australien)

Basierend auf der Unternehmensdatenbank des FCHO mit Fokus auf Europa könnte eine Erhebung der globalen Unternehmenslandschaft durchgeführt werden. Diese kann zunächst einen Überblick über die allgemeine Verteilung von Firmen im Wasserstoffsektor geben. Dabei sollte eine Charakterisierung der Unternehmen nach Fokusaktivitäten, Anzahl der Beschäftigten, Umsatz, Unternehmenstyp, etc. vorgenommen werden. Neben der systematischen Datensammlung zur Erhebung vergleichbarer Unternehmensdaten, wäre eine Zusammenfassung der wichtigsten Industrieentwicklungen in den Ländern sinnvoll. Dies würde die quantitativen Daten qualitativ ergänzen, um ein möglichst umfassendes Bild der Industrieentwicklung im Wasserstoffsektor zu erfassen.

### Analyse und Monitoring der deutschen, europäischen und internationalen Wertschöpfungsketten

Die Erhebung der globalen Unternehmenslandschaft ist eine wichtige Grundlage für eine darauf aufbauende Analyse globaler Wertschöpfungsketten. Ohne einheitlich klassifizierte Produktions- und Handelsstatistiken erfordert dies Befragungen von Unternehmen. Zu diesem Zweck sollte parallel zur Erhebung der globalen Unternehmenslandschaft in einem ersten Schritt eine aktualisierte Analyse der deutschen und europäischen Wertschöpfungsketten erfolgen. Diese Erhebung sollte einen konzeptionellen Rahmen sowie eine Datenbasis für das zukünftige Monitoring dieser Wertschöpfungsketten bilden. Auf der Basis der globalen Unternehmensdatenbank kann diese in darauffolgenden Jahren auf zusätzliche Länder außerhalb Europas ausgeweitet werden. Zentrale Indikatoren einer solchen Datenerhebung wären bspw. die Kapazitäten für die Produktion zentraler Komponenten und die tatsächlich realisierte Produktion nach Unternehmen, bzw. Produktionsland. Außerdem müssen Kennzahlen zu Umsatz, Exporten, Beschäftigung und Investitionen entlang der Wertschöpfungsketten erfasst werden.

### Monitoring kritischer Ressourcen und Technologien im Rahmen internationaler Wertschöpfungsketten

Der Zugang zu kritischen Ressourcen und Technologien ist entscheidend für den Aufbau von Wertschöpfungsketten in Deutschland und Europa. Beispielsweise wird mit zunehmender Entwicklung der globalen Wasserstoffwirtschaft ein steigender Bedarf an Platin als Katalysator für die Herstellung von Elektrolyse-Stacks und Brennstoffzellen erwartet. Im Rahmen des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) führt die deutsche Rohstoffagentur (DERA)<sup>14</sup> ein systematisches Monitoring der Rohstoffwirtschaft durch und veröffentlicht ihre Ergebnisse in der jährlich aktualisierten Rohstoffliste. Diese könnte als Datenquelle dienen, um die Versorgungssicherheit mit kritischen mineralischen Rohstoffen im Rahmen der Wasserstoffwirtschaft zu messen. Als Ausgangspunkt dient hier die Analyse der europäischen Wertschöpfungsketten im Wasserstoff- und Brennstoffzellenbereich von E4Tech für das FCH JU. Die dort identifizierten kritischen Technologien (bspw. Karbonfasern für Druckgasspeicher) sollten in ein systematisches Monitoring aufgenommen werden. Dabei wäre zu erfassen, welche Firmen diese Technologien produzieren.

<sup>14</sup> Die DERA ist angeschlossen an die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

---

## 7. Klima und Umwelt

---

### 7.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellungen

Die Herstellung von grünem Wasserstoff erfordert den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Damit steht die Herstellung von grünem Wasserstoff in Konkurrenz zum Einsatz von erneuerbaren Energien zur Deckung der Stromnachfrage. Dementsprechend muss nationale Regulierung und Qualitätsinfrastruktur sicherstellen, dass der auf erneuerbare Energien basierende Strom, der für grünen Wasserstoff verwendet wird, keine etablierten Stromanwendungen verdrängt und nicht nur das Wachstum des Wasserstoffsektors sondern auch die weitere Dekarbonisierung des Stromsektors vorantreibt. Diese sogenannte „Additionalität des erneuerbaren Stroms“ wurde auch in der REDII-Gesetzgebung der EU anerkannt, die sie als Kriterium für Kraftstoffe mit nicht-biologischen Ursprung, wie Wasserstoff, vorschreibt. In Ländern mit einer größeren fossilen Brennstoffabhängigkeit ist das Risiko, dass die Erzeugung und der Export von grünem Wasserstoff eine Verlangsamung der Emissionsminderung im Stromsektor mit sich bringt grundsätzlich stärker ausgeprägt. Dieses Risiko ist gegenwärtig bei vielen potenziellen Exporteuren von grünem Wasserstoff erkennbar und damit zentraler Aspekt für das Monitoring der Auswirkungen einer globalen Wasserstoffwirtschaft.

Zu den Klimafolgen der Wasserstoffwirtschaft kommen lokale Umweltrisiken hinzu. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang der hohe Wasserverbrauch, der für die Erzeugung von grünem Wasserstoff erforderlich ist. Ein Monitorings der Klima- und Umweltfolgen der globalen Wasserstoffwirtschaft soll daher auch in diesem Bereich die wichtigsten Trends und Entwicklungen darstellen sowie länderspezifische Risiken in potenziellen Exportländern beleuchten.

### 7.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Die verschiedenen Arten der Wasserstofferzeugung haben unterschiedliche Auswirkungen auf das Klima und andere Bereiche der Umwelt. Die Betrachtung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zeigt, dass die grüne Wasserstoffproduktion die einzige Technologie ist, deren Emissionsdaten genau bekannt sind (Bhandari, Trudewind, & Zapp, 2014; Valente, Iribarren, & Dufour, 2021). In Bezug auf die Produktion von blauem Wasserstoff fehlen noch fundierte Daten über die Effizienz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung sowie über den Energieeinsatz für die Aufbereitung des Kohlendioxids (die geologische Speicherung). Des Weiteren sind Aspekte wie die technische Machbarkeit und die gesellschaftliche Akzeptanz weiterhin umstritten (Noussan, Raimondi, Scita, & Hafner, 2020). Noch größer sind die Unsicherheiten bei der Methanpyrolyse (türkisfarbener Wasserstoff), für welche die Abschätzung der Emissionen aufgrund des niedrigen TRL noch unzureichend ist (zwischen 4 und 5; (Nezzari & Gomri, 2020).

Die Definition der Additionalität für elektrolysebasierten Wasserstoff ist eine wesentliche Herausforderung für die Evaluation der Klimaauswirkungen, obwohl es bereits mehrere Lösungsvorschläge für Europa gibt (Crone, Friese, & Löchle, 2020; Frontier Economics, 2018; Power to X Allianz, 2020; Shibata et al., 2020). Für Länder, die über eine geringe Kapazität an erneuerbaren Energien verfügen und besonders anfällig für hohe Emissionen im Zusammenhang mit der Additionalität sind, gibt es jedoch noch keine anerkannten Messansätze (Timpe, Seebach, Bracker, & Kasten, 2017). Wenn elektrolysebasierter Wasserstoff, der mit einer Mischung aus erneuerbaren Energien und Strom aus dem Netz betrieben wird (bunter Wasserstoff - siehe z. B. (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021), für den Import oder die Produktion in Europa zugelassen wird, muss darüber hinaus ein Kohlenstoffgrenzwert definiert und eingeführt werden (siehe Grenzwerte, vorgeschlagen von CertifHy Initiative<sup>15</sup>, und (Shibata et al., 2020). Die Verifikation verfügbarer Daten kann in Entwicklungsländern, aufgrund der schlechten Qualität der nationalen Energie- und Emissionsdaten, jedoch eine Herausforderung darstellen.

<sup>15</sup> Siehe hierzu: <https://www.certifyhy.eu/>.

Darüber hinaus leiden mögliche Exportländer wie etwa Saudi-Arabien<sup>16</sup> bereits unter Wasserknappheit. Der mit der Elektrolyse in Verbindung stehende Anstieg der Wassernachfrage, würde sehr wahrscheinlich zu einer Verstärkung des Wettbewerbs zwischen regionalen Wasseranwendungen führen. Zudem würde sich dies auf die lokalen Gemeinden und die Umwelt auswirken (Mehmeti, Angelis-Dimakis, Arampatzis, McPhail, & Ulgiati, 2018). Bhandari et al. (2014) weisen auf einen Bedarf von 12 Litern Süßwasser pro kg produziertem Wasserstoff hin. Aufgrund dessen muss die Belastung des Süßwassers, welche von einer entwickelten, elektrolysebasierten Wasserstoffversorgungskette in den Erzeugerländern verursacht werden kann, innerhalb der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren einbezogen werden.

### 7.3 Monitoringkonzept

Die folgenden Tabellen fassen die vorgeschlagenen Indikatoren zum Monitoring der Klima- und Umweltverträglichkeit einer globalen Wasserstoffwirtschaft zusammen. Tabelle 13 präsentiert Indikatoren zur Überprüfung der wichtigsten Umweltfolgen- und risiken im Zusammenhang mit dem Ausbau einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Dazu gehört vor allem die Erfassung der CO<sub>2</sub> Emissionen der globalen Wasserstoffwirtschaft, die Entwicklung der nachhaltigen Erzeugung von Wasserstoff (mit Nachhaltigkeitszertifizierung) sowie die Risiken der grünen Wasserstoffproduktion für die lokale Wasserversorgung. Als Grundlage für das Monitoring von nachhaltig produziertem Wasserstoff (mit Nachhaltigkeitszertifizierung) wäre es sinnvoll in einem ersten Schritt eine Auswertung bestehender Nachhaltigkeitszertifizierungen durchzuführen und die dort verankerten Kriterien und Standards zu vergleichen. Auf dieser Basis ist dann eine Einordnung der Entwicklungen auf diesem Gebiet bezüglich der tatsächlichen Nachhaltigkeitswirkungen möglich.

Tabelle 14 stellt Indikatoren dar, um die Auswirkungen des Ausbaus von strombasiertem Wasserstoff auf nationale Emissionsminderungsziele für relevante wasserstoffproduzierende Länder zu prüfen. Dadurch sollen die Auswirkungen und Risiken der Wasserstoffproduktion auf Basis erneuerbarer Energien für die Dekarbonisierung der Stromversorgung in relevanten Ländern erfasst werden. Dabei ist für einige der vorgeschlagenen Indikatoren zu beachten, dass aufgrund der geringen Wasserstoffproduktion und -anwendung im Energiesektor, derzeit keine Datenquellen verfügbar sind. Dennoch gehen wir davon aus, dass die Quantifizierung dieser Indikatoren möglich sein wird, sobald Daten über Wasserstoffmengen und damit verbundene Emissionen veröffentlicht werden. Als mögliche zukünftige Datenquellen werden nationale Emissions- und Energieberichte, internationale Energieagenturen (z.B. IEA), Wasserstoffverbände oder unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) eingereichte Emissionsdaten gesehen. Diese wurden in Tabelle 15 entsprechend angegeben.

Über das hier vorgeschlagene Monitoring auf globaler und nationaler Ebene hinaus sollten für Projekte mit Unterstützung der Bundesregierung unbedingt Umweltverträglichkeitsprüfungen durchgeführt werden. Hier bestünde ggf. die Möglichkeit im Rahmen dieser Aktivitäten auch ein längerfristig angelegtes Monitoring dieser Projekte zu etablieren. Diese Monitoringaktivitäten auf Projektebene könnten so angelegt werden, dass vergleichbare Daten erhoben und im Rahmen des hier skizzierten Monitoringprozesses zusammengeführt und ausgewertet werden könnten. Auf diese Weise könnte auch eine Ableitung von Lernerfahrungen und Best Practices erfolgen und für die Weiterentwicklung internationaler Förderinstrumente nutzbar gemacht werden.

<sup>16</sup> Siehe hierzu: <https://www.statista.com/statistics/1097524/water-stress-levels-by-country/>.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark                          | Datenquelle  | Zweck   |
|--|--|--|---|
| Geschätzte durchschnittliche CO <sub>2</sub> Emissionen pro kg Wasserstoff nach Herstellungsverfahren      | kg<br>CO <sub>2</sub> eq./kg<br>H <sub>2</sub> | Derzeit noch nicht verfügbar. Zukünftig können entsprechende Daten den Einreichungen im Rahmen der UNFCCC sowie nationaler Klimaberichte entnommen werden.   | Dieser Indikator zeigt Trends bezüglich der CO <sub>2</sub> Bilanz der unterschiedlichen Wasserstoffherstellungsverfahren auf.                                |
| Gesamtemissionen der Wasserstoffproduktion (gesamt und nach Herstellungsverfahren)                         | Tonnen<br>CO <sub>2</sub> eq.                  | Derzeit noch nicht verfügbar. Zukünftig sollten entsprechende Daten über übliche Quellen, wie IEA oder die U.S. Environmental Protection Agency (EPA) verfügbar sein.  | Dieser Indikator ermöglicht das Monitoring der CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Wasserstoffherstellung im Zeitverlauf.  |
| Anteil der strombasierten Wasserstoffherstellung auf Basis 100% erneuerbaren Energien-Basis (mit Nachweis) | %; global<br>und in einzelnen Ländern          | Derzeit noch nicht verfügbar. Der vorgeschlagene Indikator kann aus Rohdaten zu 100% erneuerbar-basierten Wasserstoffmengen und Gesamt-Wasserstoffmengen (in einzelnen Ländern und global) generiert werden. | Dieser Indikator zeigt Fortschritte beim Ausbau der Wasserstoffherstellung auf der Basis von 100% erneuerbarer Energien auf.                                  |
| Anteil der Wasserstoffherzeugung mit Nachhaltigkeitszertifizierung   | %; global<br>und in einzelnen Ländern          | Derzeit noch nicht verfügbar. Es wird erwartet, dass die Daten zukünftig von Europäischen Zertifizierungsstellen (z. B. CertifHy, CEP für Deutschland) veröffentlicht werden.                                | Dieser Indikator zeigt Fortschritte bei der Einführung von Nachhaltigkeitskriterien im Wasserstoffsektor auf.   |
| Länder mit signifikanter strombasierter Wasserstoffherzeugung bei gleichzeitiger Wasserknappheit           | Liste der<br>Länder                            | Länder mit signifikanter Wasserknappheit:<br>Indikatoren "Wasserstress" (>mittel-hoch) und "Dürrisiko" (>mittel-hoch) in der Online-Datenbank Aqueduct Water Risk Atlas <sup>17</sup>                        | Diese Indikatoren zeigen kritische Trends in Bezug auf die Auswirkung des Ausbaus der erneuerbaren Wasserstoffherzeugung auf die globale Wasserknappheit auf. |
| Anteil der strombasierter Wasserstoffherstellung in Ländern / Regionen mit Wasserknappheit                 | %  | Basierend auf der Liste der Produktionsländer mit signifikanter Wasserknappheit.   | Diese Indikatoren zeigen kritische Trends in Bezug auf die Auswirkung des Ausbaus der erneuerbaren Wasserstoffherzeugung auf die globale Wasserknappheit auf. |

Tabelle 14: Indikatoren für das Monitoring der Klima- und Umweltverträglichkeit der globalen Wasserstoffwirtschaft

<sup>17</sup> Verfügbar unter: <https://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>.

| Indikator   | Einheit/<br>Benchmark   | Datenquelle   | Zweck   |
|---|---|---|---|
| Technisches Erzeugungspotenzial für den Ausbau erneuerbarer Energien im Verhältnis zur aktuellen Stromnachfrage   | Jährliches technisches Erzeugungspotenzial / Jährliche Stromnachfrage aktuell und geschätzt für 2050 in TWh); Benchmarks für niedriges, mittleres und hohes Potenzial im Verhältnis zur Nachfrage | Technisches Erzeugungspotenzial: Technische Berichte (z. B. Renewables Global Futures Report von REN21<br>Jährlicher Strombedarf nach Ländern: Nationale Energieberichte, IEA's Renewables 2020 und zukünftige Ausgaben | Eine entsprechende Einordnung der Länder ermöglicht eine Einschätzung, ob zu erwarten ist, dass Erzeugung von strombasiertem Wasserstoff mit der Dekarbonisierung der Stromerzeugung vereinbar ist.   |
| Anteil der Stromimporte am heimischen Strommix  | %; Benchmarks für niedrigen, mittleren und hohen Importanteil   | Nationale Energieberichte forschungsrelevanter Länder;<br>Enerdata Online-Plattform <sup>18</sup>   | Dieser Indikator zeigt an, ob das jeweilige Land überschüssigen Strom produziert oder signifikante Importe aufweist. Im letzteren Fall wäre zu untersuchen, ob ein künftiger Überschuss an erneuerbaren Energien für die Wasserstoffproduktion zu erwarten ist. |
| Durchschnittlicher CO2 Ausstoß pro kWh der heimischen Stromerzeugung  | Tonnen CO2 / kWh; Benchmarks für niedrigen, mittleren und hohen CO2 Ausstoß   | Nationale Energieberichte forschungsrelevanter Länder;<br>Open-Source-Datenbank: Electricitymap.org   | Dieser Indikator ermöglicht eine Einschätzung des Handlungsdrucks für die Dekarbonisierung des Stromsektors und dem damit verbundenen Ausbau der erneuerbaren Energien.   |
| Anteil der fossilen / kohlebasierten Stromerzeugung im heimischen Strommix  | %; Benchmarks für niedrigen, mittleren und hohen Anteil fossiler / kohlebasierten Stromerzeugung  | Anteil der fossilen Stromerzeugung nach Ländern: Electricitymap.org<br>Anteil der kohlebasierten Stromerzeugung nach Ländern: Global Energy Monitor <sup>19</sup>   | Dieser Indikator zeigt an, wie weit die Dekarbonisierung des nationalen Stromsektors bereits fortgeschritten ist.   |
| Erreichung der nationalen Klimaziele / Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor laut national festgelegten Beiträgen (NDC) zum Pariser Klimaabkommen | GW; Differenz zwischen der tatsächlichen und der im NDC geplanten CO2 Reduzierung, in Tonnen CO2; Differenz zwischen tatsächlichem und geplantem Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor  | Nationale Emissionsminderungsziele im Stromsektor: INDC-Einreichungen <sup>20</sup> ; INDC-Monitoring-Tools <sup>21</sup><br>Erzielte Emissionsminderungen im nationalen Stromsektor: Nationale Energieberichte         | Dieser Indikator zeigt auf, ob das Land seine geplanten Beiträge erbringt. Länder, die dies nicht tun, sind für den Ausbau von grünem Wasserstoff kritisch zu sehen.  |

<sup>18</sup> Verfügbar unter: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-balance-trade.html>.

<sup>19</sup> Verfügbar unter: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/summary-data/>.

<sup>20</sup> Verfügbar unter: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/Pages/Home.aspx>.

<sup>21</sup> Verfügbar unter: <https://cait.wri.org/indc/#/>. Sowie: <https://climateactiontracker.org/>.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark  | Datenquelle   | Zweck   |
|--|--|---|---|
| Kompatibilität des NDC mit den internationalen Klimazielen                                       | Tonnen CO <sub>2</sub> ; Differenz zwischen der im NDC geplanten CO <sub>2</sub> Reduzierung und den internationalen Klimazielen | Erforderliche NDC und Emissionsreduktionen, im Rahmen des Pariser Abkommens:<br>NDC-Monitoring-Plattformen und Online-Tracker <sup>22</sup> | Dieser Indikator bewertet, wie ehrgeizig die nationalen Emissionsminderungsziele im Verhältnis zur notwendigen CO <sub>2</sub> -Minderung zur Erreichung der Pariser Klimaziele sind. |
| Regulierung zur „Additionalität“ der erneuerbaren Stromversorgung für die Wasserstoffherstellung | Vorhandene Regulierung nach Ländern  | Nationale Regulierung   | Dieser Indikator zeigt auf, inwiefern die Frage Additionalität im Rahmen der Wasserstoffförderung berücksichtigt wird.  |

**Tabelle 15: Indikatoren für das Monitoring der Auswirkung der Wasserstoffproduktion auf die Reduzierung von CO<sub>2</sub> Emissionen im Stromsektor**

<sup>22</sup> Verfügbar unter: <https://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>.

---

## 8. Governance und soziale Entwicklung

---

### 8.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellung

Fragen von Governance und sozialer Entwicklung spielen für die Entwicklung einer globalen Wasserstoffwirtschaft in mehreren Hinsichten eine Rolle. Zum einen stellt sich die Frage welche Rolle die soziale und politische Akzeptanz unterschiedlicher Wasserstofftechnologien in führenden Anwendungsmärkten, wie der EU oder Japan, für die Marktentwicklung spielt. Insbesondere der Einsatz von Technologien zur Abscheidung von Kohlenstoff ist hier politisch umstritten und könnte bspw. Rückwirkungen auf die Akzeptanz von klimafreundlichen Wasserstoffimporten in Deutschland haben. Ebenso kann aber auch die Produktion von grünem Wasserstoff in Ländern außerhalb der Europäischen Union Fragen von sozialer Verantwortung gegenüber der Bevölkerung in den Produktionsländern aufwerfen (Holger, Jan, Petra, Andrea, & Jürgen-Friedrich, 2017). Ähnlich wie bei der Entwicklung von Biokraftstoffen aus Palmöl, sind Produktionsbedingungen in Erzeugerländern auch für die Akzeptanz in den Endverbrauchermärkten relevant.

Dementsprechend spielt die Entwicklung und Anwendung von Zertifizierungssystemen zur Sicherung sozial nachhaltiger Produktionsbedingungen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft eine wichtige Rolle. Im Sinne der sozialen Nachhaltigkeit sollten diese sicherstellen, dass positive Effekte gefördert und mögliche negative Auswirkungen vermieden werden. Es ist mittlerweile auch allgemein anerkannt, dass die Einhaltung entsprechender Standards maßgeblich zur Investitionssicherheit beiträgt. Somit sind sie auch ein zentraler Aspekt für eine sichere Versorgung mit Wasserstoffimporten. Dies ist insbesondere in Produktionsländern von Bedeutung, in denen Governance-Strukturen nicht ausreichend entwickelt sind, um negativen sozialen Auswirkungen vorzubeugen. Für Projekte, an denen die Bundesregierung direkt beteiligt ist, ist diese soziale Verantwortung von besonderer Bedeutung. Die Bundesregierung ist der Erreichung der globalen Nachhaltigkeitsziele (SDGs) verpflichtet und sollte auch bei der Umsetzung von Wasserstoffprojekten sicherstellen, dass die Auswirkungen dieser Projekte zur lokalen sozioökonomischen Entwicklung und damit zur Erreichung der SDGs beitragen.

Für das Monitoring dieser Aspekte werden zwei wesentliche Ansatzpunkte vorgeschlagen. Erstens sollte ein kontinuierliches Monitoring der sozialen und politischen Akzeptanz von Wasserstofftechnologien durchgeführt werden. Hierbei sind neben Deutschland und Europa vor allem Länder mit bedeutendem Exportpotenzial sowie andere zentrale Vorreiterländer bei der Anwendung von Wasserstoff von Bedeutung. Für Länder mit wichtigem Exportpotenzial könnte dies durch ein allgemeines Monitoring von Governance-Strukturen bzw. des Investitionsklimas ergänzt werden. Bei fortschreitender Entwicklung von Importbeziehungen bietet dies einen Ansatzpunkt für die Bewertung der Versorgungssicherheit. Zweitens, sollte das Monitoring Fortschritte bei der Gewährleistung sozialer Standards auf der Projektebene bzw. in der Lieferkette adressieren. Für Projekte, an denen die Bundesregierung beteiligt ist, wäre zudem ein direktes Monitoring sozialer Auswirkungen auf der Projektebene sinnvoll. Letzteres kann in diesem Bericht allerdings nicht umfassend berücksichtigt werden. Im Folgenden werden daher nur allgemeine Ansatzpunkte skizziert.

### 8.2 Wissensstand und Datenverfügbarkeit

Während es bisher nur eine begrenzte Anzahl von Studien gibt, die sich mit der sozialen Nachhaltigkeit von grünem Wasserstoff befassen, haben allgemeine Studien zur Wasserstoffwirtschaft bereits mehrere soziale Effekte und Auswirkungen der Produktion sowie Verteilung und Nutzung von grünem Wasserstoff in Import- und Exportländern identifiziert. Für Länder mit umfangreichen erneuerbaren Energieressourcen ergeben sich beispielsweise Chancen im Bereich der sozioökonomischen Entwicklung, wie die Schaffung von Arbeitsplätzen, höhere

Steuereinnahmen, die Reduzierung von Treibhausgasen, eine bessere Luftqualität sowie eine Verbesserung der diplomatischen Beziehungen (Bhagwat & Olczak, 2020; Scita, Raimondi, & Noussan, 2020). Bislang konzentrieren sich Publikationen jedoch überwiegend auf mögliche soziale Risiken und negative soziale Folgen im Zusammenhang mit der Produktion von grünem Wasserstoff, wie Konflikte um Land für die damit verbundene Erzeugung erneuerbarer Energien und die Nutzung von Süßwasserressourcen (Bax, 2020; Holger et al., 2017; Pflugmann & De Blasio, 2020; Scita et al., 2020; Szinai, Deshmukh, Kammen, & Jones, 2020). Aufgrund von bereits bestehenden sozialen Rahmenbedingungen, Ungleichheiten, dem fehlenden Zugang zu grundlegenden Dienstleistungen wie Wasser- und Sanitärversorgung sowie erschwinglicher, zuverlässiger und sauberer Energieversorgung, wird erwartet, dass diese Risiken überwiegend in Nicht-OECD-Ländern auftreten können (Holger et al., 2017).

Es besteht ein Konsens darüber, dass die Abhängigkeit von Süßwasser für die Produktion von grünem Wasserstoff nicht nur aus ökologischen Gründen, sondern auch aufgrund der möglichen sozialen Folgen ein sensibles Thema für die Implementierung grüner Wasserstoffproduktion in wasserarmen Gebieten wie dem Nahen Osten und Nordafrika bleibt. Dies ist auf eine bestehende Konkurrenz in der Wassernachfrage seitens der lokalen Industrie, der Landwirtschaft sowie von privaten Nutzern zurückzuführen (Scita et al., 2020). Die Entsalzung von Salzwasser wurde als eine mögliche Lösung für die Süßwasserknappheit in diesen Regionen vorgeschlagen (Bhagwat & Olczak, 2020; Szinai et al., 2020). Aufgrund hoher Kosten bleibt jedoch fraglich, inwieweit dies zu einer Abmilderung der Auswirkungen beitragen kann. Darüber hinaus wurde das Problem der Sicherheit von Wasserstoff thematisiert. Wasserstoff ist ein hochentzündliches und explosives Gas, jedes Leck kann speziell während der Produktion, der Verteilung und der Nutzung zu großen Sicherheitsrisiken führen (Armaroli & Balzani, 2011; Midilli, Ay, Dincer, & Rosen, 2005). Aufgrund dessen empfiehlt die IEA Sicherheitsmaßnahmen zur Unterstützung der Kommerzialisierung von Wasserstoff zu priorisieren (IEA, 2019).

Derzeit gibt es keine einheitlichen Daten, welche sich ausschließlich auf Governance und soziale Bedingungen der Produktion, Verteilung und Nutzung von grünem Wasserstoff konzentrieren. Diese Lücke besteht vor allem in Bezug auf die Projektebene. Im Gegensatz dazu, steht für eine allgemeine Bewertung von Governance und institutionellen Kapazitäten eine Vielzahl von Informationsquellen zur Verfügung. Die Governance-Indikatoren der Weltbank stellen in dieser Hinsicht bspw. eine nützliche Quelle dar, da sie Daten aus einer Reihe anderer prominenter Quellen zusammenfassen und vergleichende Daten über eine Vielzahl von Ländern bieten. Darüber hinaus fördern das BMBF und das BMU Verbundprojekte, darunter das HyPat-Projekt unter Leitung des Fraunhofer ISI und unter Beteiligung des IASS, welche Abschätzungen zu dem Potenzial von grünem Wasserstoff auf globaler Ebene und in Afrika<sup>23</sup> vornehmen werden. Diese Untersuchungen berücksichtigen auch Fragen von Governance und sozialer Entwicklung und könnten Ausgangspunkte für eine systematische Datenerhebung über einen längeren Zeitraum bieten.

Des Weiteren gibt es nur wenige Studien und verfügbare Daten, die die öffentliche Wahrnehmung und soziale Akzeptanz von Wasserstoff bewerten (IEA, 2019; Iribarren, Martín-Gamboa, O'Mahony, & Dufour, 2015). Studien zum Verständnis der öffentlichen Wahrnehmung und der sozialen Akzeptanz sind deshalb sowohl in Export- als auch in Importländern erforderlich, um entsprechende Risiken der Entwicklung und Nutzung von Wasserstoff zu erfassen.

### 8.3 Monitoringkonzept

Das Monitoring von Governance und sozialer Entwicklung im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft umfasst drei wesentliche Dimensionen, die im Folgenden näher erläutert werden: die soziale Akzeptanz von Wasserstofftechnologien, die Qualität und Robustheit von Institutionen in relevanten Erzeugerländern sowie die Qualität und den Grad der Institutionalisierung internationaler Handels- und Wirtschaftsbeziehungen mit der EU. Tabelle 16 gibt einen Überblick der vorgeschlagenen Indikatoren und Datenquellen.

<sup>23</sup> Siehe hierzu: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/energieforschung-mit-afrika/potentialatlas-gruener-wasserstoff-afrika.php>.

| Indikator  | Einheit/<br>Benchmark  | Datenquelle   |
|--|--|---|
| Soziale Akzeptanz von Wasserstofftechnologien                      | Abhängig von der Ausgestaltung der Befragung   | Bevölkerungs- oder Expertenbefragungen (noch nicht vorhanden)       |
| Performanz und Stabilität von Governance und Institutionen         | Länder-Ranking / Zuordnung zu Quartilen  | Weltbank Governance Indicators; Fragile States Index                |
| Investitionsklima  | Länder-Ranking / Zuordnung zu Quartilen  | Doing Business Indikatoren der Weltbank                             |
| Investitionsklima und regulatives Umfeld – Erneuerbare             | Länder-Ranking / Zuordnung zu Quartilen  | Regulatory Indicators for Sustainable Energy                        |
| Qualität und Grad der Institutionalisierung der Handelsbeziehungen | Zugehörigkeit zu WTO, Energy Charter Treaty, sonstige Handels- und Investitionsabkommen; Frequenz von Handelskonflikten mit der EU | Webseiten der WTO, Energy Charter Treaty und Europäische Kommission |
| Anteil der globalen Zertifizierung von Sozialstandards             | %; global und in einzelnen Ländern   | Zertifizierungsorganisationen                                       |

**Tabelle 16: Indikatoren für das Monitoring von Governance und sozialer Entwicklung in der globalen Wasserstoffwirtschaft**

Für das Monitoring der sozialen Akzeptanz von Wasserstofftechnologien kommen grundsätzlich eine große Bandbreite sowohl quantitativer als auch qualitativer Methoden in Frage. Die zentrale Herausforderung besteht allerdings in der Erstellung einer vergleichbaren Datenbasis. Bisher gibt es auch auf europäischer Ebene keine repräsentativen Umfragen, bspw. im Rahmen des Eurobarometers, in denen die soziale Akzeptanz von Wasserstofftechnologien länderübergreifend erfasst werden. Für Deutschland wurden im Rahmen des Sozialen Nachhaltigkeitsbarometers der Energiewende, einer jährlich stattfindenden Befragung zu sozialen Fragen der Energiewende, für das Jahr 2021 zum ersten Mal Fragen zu Wasserstofftechnologien integriert. Eine Ausweitung auf weitere Länder wird angestrebt, es besteht aber bisher keine Finanzierungsbasis für eine entsprechende Erweiterung. Alternativ zu repräsentativen Befragungen können Expertenbefragungen für entsprechende Erhebungen eingesetzt werden.

Darüber hinaus könnte für Länder, die wichtiges Potenzial für die Erzeugung von Wasserstoff aufweisen, ein Monitoring der Performanz von Governance und Institutionen sowie des Investitionsklimas, sowohl allgemein als auch speziell für den Bereich der erneuerbaren Energien durchgeführt werden. Hierfür würden sich bspw. eine Reihe von Indikatoren der Weltbank eignen, die es ermöglichen Länderrankings zu erstellen (siehe Tabelle). Dies ermöglicht es Länder bspw. anhand der Rankings Quartilen zuzuordnen, um so einen Überblick über Governance und Investitionsklima in den wichtigsten Exportländern zu erhalten. Ein weiterer Indikator, der zu diesem Zweck zum Einsatz kommen könnte, ist der Fragile States Index, der die allgemeine Vulnerabilität von Staaten in Bezug auf politische Konflikte und deren Potenzial die allgemeine Stabilität staatlicher Strukturen zu gefährden. Bei den Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE) der Weltbank wäre eine Weiterentwicklung der Indikatoren zur Besserung Erfassung des Wasserstoffsektors denkbar. Dies kann durch eine Bewertung bestehender Handelsbeziehungen mit der EU ergänzt werden. Hier spielen beispielsweise Zugehörigkeit zur Welthandelsorganisation (WTO), ergänzende bilaterale oder multilaterale Handels- und Investitionsabkommen mit der EU (wie bspw. der Energy Charter Treaty) sowie die Häufigkeit von Handelskonflikten mit den jeweiligen Partnern und der EU. Daten zu Handelskonflikten können über das Portal der WTO für einzelne Länder bezogen werden.

Schließlich kann für das Monitoring von sozialen Nachhaltigkeitsaspekten in der Wasserstofflieferkette bzw. auf Projektebene, analog zu Fragen zum Themenfeld Klima und Umwelt überprüft werden, welcher Anteil der globalen Wasserstoffproduktion über eine Nachhaltigkeitszertifizierung verfügt. Als Grundlage hierfür müsste eine

Bewertung der vorhandenen Zertifizierungen bzgl. der Verankerung relevanter sozialer Aspekte durchgeführt werden. Auf dieser Basis könnte eine zusätzliche Einteilung in Zertifizierungen mit unterschiedlich starker Berücksichtigung von Sozialstandards erfolgen.

# TEIL C: Fokusanalysen

Ein systematisches Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft, wie es in Teil B vorgestellt wurde, liefert eine umfassende Datengrundlage für weiterführende Analysen. Je nach Erkenntnisinteresse lassen sich unterschiedliche Fragestellungen in Fokusanalysen bearbeiten, die aus der Gesamtmenge erhobener Daten schöpfen können. Der modulare Monitoringkonzept bietet dazu ausreichend Flexibilität und kann in weiteren Arbeitsschritten um weitere Informationen, bspw. aus Experteneinschätzungen, ergänzt werden. Dabei dient das Monitoring ebenfalls als Grundlage für einen systematischen Austausch mit relevanten Akteuren aus der Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft.

Im Folgenden werden, basierend auf den konzeptionellen Ausführungen in Teil A und den in Teil B definierten Indikatoren, mögliche Fokusanalysen zu Wettbewerbsfähigkeit sowie wirtschaftlicher und technologischer Souveränität vorgestellt. Es wird dargestellt welche zentralen Fragestellungen durch eine zusätzliche Analyse beantwortet werden können, in welchen Arbeitsschritten eine solche Analyse durchzuführen wäre, und welche Daten aus dem systematischen Monitoring (Teil B) die Grundlage dafür liefern.

---

# 1. Wettbewerbsfähigkeit

---

## 1.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellung

Sowohl die Bundesregierung als auch die europäische Kommission fördern durch ihre jeweiligen Wasserstoffstrategien die Herausbildung eines internationalen Marktes für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Dadurch schaffen sie ein Gelegenheitsfenster für die Etablierung eines neuen Industriezweiges. Durch umfangreiche Fördermaßnahmen soll die Produktion von klimaneutralem Wasserstoff hochgefahren werden und die Nachfrage möglichst schnell vergrößert werden. Ziel ist die Dekarbonisierung der Sektoren Transport, Wärme, Industrie sowie die Speicherung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien. Der Aufbau einer Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie bietet die Möglichkeit ökologische und wirtschaftliche Vorteile zu verbinden. Diese Bestrebungen haben Deutschland und die EU allerdings nicht allein und so sind weitere Staaten ebenfalls bemüht einen globalen Wasserstoffmarkt zu schaffen und möglichst große Marktanteile für die eigenen Industrien zu sichern. Wie in Teil A, Abschnitt 3.1 beschrieben, wird die Wettbewerbsfähigkeit maßgeblich von Technologiebeschaffenheit, Marktentwicklung sowie Kapazitäten nationaler bzw. regionaler Innovationssysteme beeinflusst. Moderne globale Produktionsketten umfassen zahlreiche Komponenten und Technologieprodukte und die Potenziale für die Herausbildung wettbewerbsfähiger nationaler Industrien kann sich je nach Technologieprodukt stark unterscheiden.

Ziel einer Analyse ist es unter Berücksichtigung der Beschaffenheit von Technologien, vorhandener Innovations- und Fertigungskapazitäten in zentralen Ländern der globalen Wasserstoffwirtschaft sowie Marktentwicklungen mögliche Wettbewerbspotenziale für deutsche und europäische Hersteller zu identifizieren. Dies dient der Identifikation möglicher Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung nationaler und europäischer Förderpolitik.

## 1.2 Analysekonzept

Aufbauend auf den Daten, die im Rahmen des systematischen Monitorings erhoben werden, kann die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen, bzw. europäischen Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrien analysiert werden. Zunächst muss die Technologiebeschaffenheit einzelner kritischer Komponenten und Technologieprodukte entlang der Wertschöpfungsketten untersucht werden. In einem zweiten Schritt werden das Innovationssystem in Deutschland und Europa, sowie die Marktentwicklung in Bezug auf Wettbewerbsfähigkeit analysiert. Dies bildet schließlich die Basis, um Handlungsstrategien für Politik und Industrie abzuleiten (Vgl. Abbildung 2: Einflussfaktoren auf Wettbewerbsfähigkeit).

### Technologiebeschaffenheit

Die Wettbewerbsfähigkeit deutscher bzw. europäischer Unternehmen wird unter anderem dadurch bestimmt, wie die Technologie beschaffen ist. Die Technologiebeschaffenheit beeinflusst die Rolle technologiespezifischer Wettbewerbsvorteile sowie die Industriestruktur. Da sie nicht durch politische und unternehmerische Entscheidungen beeinflussbar ist, bildet sie die Ausgangslage zur Analyse der Wettbewerbsfähigkeit deutscher bzw. europäischer Unternehmen in der globalen Wasserstoffwirtschaft.

Wie in Teil B, Abschnitt 6.3 dargestellt sollte zu diesem Zweck im Rahmen einer Initialerhebung für das Monitoring von Industrie und Wertschöpfung eine Abschätzung der Komplexität unterschiedlicher Technologien bzw. Segmenten wichtiger Wertschöpfungsketten vorgenommen werden. Dabei sollte zwischen dem Grad der Komplexität entlang der Fertigungsprozesse und der Designkomplexität für die einzelnen Technologieprodukte unterschieden werden. Darüber hinaus kann der Grad der Anpassung einzelner Technologieprodukte im Rahmen der Anwendung abgeschätzt werden (vgl. Teil A, Abschnitt 3.1). Zusammen kann dies als Grundlage für eine

daraufliegende generische Abschätzung der technologiespezifischen Wettbewerbspotenziale deutscher und europäischer Industrien dienen. Die Analyse sollte auf der Basis von nationalen und internationalen Experteneinschätzungen, einschließlich Unternehmensvertreter\*innen aus der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie, erfolgen. Dieses Experten-basierte Vorgehen kann zudem durch Indikatoren, wie der Produkt-Komplexitätsindex von (Hausmann et al., 2013), ergänzt bzw. validiert werden. Dabei findet noch keine Betrachtung der spezifischen Kapazitäten für die Entwicklung der jeweiligen Industriezweige in unterschiedlichen Ländern oder Regionen statt.

## Kapazitäten nationaler Innovationssysteme und Marktentwicklungen

In einem zweiten Schritt sollte für Technologieprodukte mit relativ hohem generischem Potenzial eine zusätzliche Analyse denkbarer Marktentwicklungen sowie bereits existenter Innovationskapazitäten in Deutschland und Europa (relativ zu wichtigen Wettbewerbern) durchgeführt werden. Sowohl die Kapazitäten des nationalen Innovationssystems als auch die Marktentwicklung im Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor beeinflussen den Erwerb von Wettbewerbsvorteilen deutscher und europäischer Unternehmen. Gesondert nach Technologieprodukten entlang der Wertschöpfungsketten kann eine Analyse der Stärken und Schwächen des Innovationssystems und der erwarteten Heimmarktentwicklungen durchgeführt werden.

Für ersteres spielen Daten zu Forschung und Innovation eine besonders wichtige Rolle, da in diesem Bereich bereits in frühen Phasen der Industrieentwicklung technologiespezifische Analysen anhand von Publikations- und Patentdaten (siehe Teil B Abschnitt 5) möglich sind. Auf diese Weise kann bereits frühzeitig eingeschätzt werden, welche relative Wettbewerbsposition deutsche und europäische Unternehmen einnehmen. Dies kann durch eine Analyse der relativen Stärken im Bereich der Qualitätsinfrastruktur (Teil B, Abschnitt 4) sowie der vorhandenen Industriestruktur (Teil B, Abschnitt 6) ergänzt werden. Letzteres hat allerdings in frühen Phasen der Industrieentwicklung nur eine geringe Aussagekraft und kann sich unter Umständen sehr schnell wandeln.

Die erwarteten Marktentwicklungen in wichtigen Ländern der Wasserstoffwirtschaft stellen einen weiteren Einflussfaktor dar. Insbesondere bei Technologien mit hoher Designkomplexität und einem hohen Grad der Anpassung an lokale Marktbedingungen ist die Entwicklung eines Heimmarktes wichtige Voraussetzung, um Wettbewerbsvorteile zu erlangen. In frühen Marktphasen spielen nicht nur Daten zur Marktentwicklung selbst (Teil B, Abschnitt 1) sondern vor allem auch Entwicklungen im Bereich Politik und Regulierung (Teil B, Abschnitt 3) eine zentrale Rolle für die Abschätzung entsprechender Marktpotenziale (Siehe Tabelle 17). Vor diesem Hintergrund können Daten aus diesen zwei Themenfeldern genutzt werden, um eine vergleichende Analyse der wichtigen Vorreiterländer vorzunehmen. Auf diese Weise können relative Vorteile in Bezug auf die Heimmarktentwicklung dargestellt werden.

| <b>Dimension</b>                          | <b>Relevante Themenfelder des Monitoringkonzeptes</b>   |
|---|---|
| Analyse nationaler Innovationskapazitäten | Forschung und Innovation (Teil B, Abschnitt 5); Qualitätsinfrastruktur (Teil B, Abschnitt 4), Industrie und Wertschöpfung (Teil B, Abschnitt 6) |
| Analyse der erwarteten Marktentwicklung   | Kosten- und Marktentwicklung (Teil B, Abschnitt 1), Politik und Regulierung (Teil B, Abschnitt 3)   |

**Tabelle 17: Datenquellen für die Analyse der Kapazitäten des Innovationssystems und der Marktentwicklung**

Die Analyse der Technologiebeschaffenheit, der Marktentwicklung und Kapazitäten nationaler Innovationssysteme ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Wettbewerbspotenziale deutscher und europäischer Industrieakteure nach Technologien entlang der Wertschöpfungsketten. Auf diese Weise kann eine Wissensbasis für die Entwicklung politischer Handlungsoptionen geschaffen werden, um Wettbewerbsvorteile in vielversprechenden Industriezweigen zu erschließen.

---

## 2. Wirtschaftliche und technologische Souveränität

---

### 2.1 Zielsetzung und zentrale Fragestellung

Das Monitoring der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität baut auf dem in Abschnitt 3.2 in Teil A des Berichtes dargestellten Konzeptes auf. Im Vordergrund stehen hier Fragen potenzieller struktureller Abhängigkeiten im Rahmen einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft und den damit verbundenen Implikationen.

Die wirtschaftliche Souveränität eines Staates, oder Staatenbundes, setzt sich aus der Erschließung von kritischen Rohstoffen, der vorteilhaften Positionierung ihrer Wirtschaftsakteure in globalen Produktions- und Wertschöpfungsketten, und der Technologiesouveränität zusammen (Edler et al., 2020). Letztere gewinnt in Anbetracht des internationalen Wettbewerbs bei der Entwicklung neuer Technologien, unter anderem im Wasserstoffsektor, zunehmend an Bedeutung (BMBF, 2021). Noch ist die Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie jedoch am Anfang und unterliegt dynamischen Prozessen, die eine Einschätzung der deutschen und europäischen Technologiesouveränität erschweren. Andererseits ist es gerade in frühen Entwicklungsphasen möglich, Maßnahmen zu ergreifen, um Risiken oder einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden oder abzuschwächen. In dem Sinne soll das folgende Analysekonzept eine systematische Grundlage für die Untersuchung der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität im Wasserstoffsektor schaffen.

### 2.2 Analysekonzept

Wie in Teil B, Abschnitt 3.2 dargestellt ist wirtschaftliche Souveränität die Fähigkeit „durch eigenständige Aktivitäten oder im gegenseitigen Austausch mit anderen Wirtschaftsräumen Wertschöpfung und Wohlstand zu generieren, ohne in einseitige Abhängigkeit von externen Akteuren zu geraten“ (Edler et al., 2020, p. 11). Dies beinhaltet den Zugang zu natürlichen Ressourcen und Kapital, sowie den Zugriff auf Technologien, Innovation, Kompetenzen und Daten. Technologische Souveränität ist also ein entscheidender Faktor wirtschaftlicher Souveränität. Im Falle Deutschlands ist der Bezugsrahmen für den wirtschaftliche und technologische Souveränität angestrebt wird die Europäische Union. Dies ist durch die starke politische und ökonomische Integration begründet, sowie geteilte politische und soziale Wertvorstellungen. In Bezug auf den Wasserstoffsektor wäre also zunächst zu prüfen, zu welchem Grade der Bedarf an Wasserstoff und den damit verbundenen Technologien durch Kapazitäten innerhalb der EU gesichert werden könnte. Wo das nicht zutrifft, ist zu bewerten, welche Abhängigkeiten bestehen und welche Versorgungsrisiken damit einhergehen, sowie ob Substitute für kritische Technologien verfügbar sind.

### Performanz und Verfügbarkeit heimischer Kapazitäten und Ressourcen

Die Analyse des eigenen Potenzials für wirtschaftliche und technologische Souveränität gliedert sich in eine Auswertung der eigenen technologische Kompetenzen und die damit verbundene Wettbewerbsfähigkeit lokaler Produktions- und Wertschöpfungsketten sowie der regionalen Verfügbarkeit notwendiger Rohstoffe (Edler et al., 2020). Analog zur Analyse des Innovationssystem in der Fokusanalyse zur Wettbewerbsfähigkeit liefern Daten aus den Abschnitten zu Forschung und Innovation, Qualitätsinfrastruktur sowie Industrie und Wertschöpfung Einblicke in die relative Performanz des Innovationssystems Deutschlands und Europas entlang der Wertschöpfungsketten der globalen Wasserstoffwirtschaft. Ergänzend dazu kann die regionale Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe (auch im Anschnitt Industrie und Wertschöpfungsketten verortet) in die Analyse der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität einfließen (Siehe Tabelle 18).

| Dimension  | Relevante Themenfelder des Monitoringkonzeptes                     |
|--|--|
| Innovationskapazitäten und Wettbewerbsfähigkeit heimischer Industrie | Analog zur Fokusanalyse Wettbewerbsfähigkeit (Teil C, Abschnitt 1) |
| Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe in der EU                         | Industrie und Wertschöpfung (Teil B, Abschnitt 6)                  |

Tabelle 18: Datenquellen für die Analyse eigener Kompetenzen und Ressourcen für technologische Souveränität

## Abhängigkeit und Zugriff auf externe Kompetenzen und Ressourcen

Der zweite Teil der Analyse untersucht technologische Abhängigkeiten und den verlässlichen Zugriff auf kritische Rohstoffe, darunter auch klimafreundlichen Wasserstoff für die Anwendung und Weiterverarbeitung entlang der Produktions- und Wertschöpfungsketten im Wasserstoff- und Brennstoffzellensektor. Für die Analyse der technologischen Abhängigkeit können aufbauend auf der Analyse zu den Innovationskapazitäten Deutschlands bzw. der EU im Bereich der identifizierten kritischen Technologien der Grad der Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen, anhand von Benchmarks, definiert werden. Dabei sind der Anteil der Patente und Publikationen relevanter Wirtschaftsräume, sowie internationale Standards von Bedeutung (Teil B, Abschnitt 4 und 5). Bei fortschreitender Entwicklung einer globalen Wasserstoffwirtschaft können auch technologie-spezifische Analysen internationaler Handelsdaten, gruppiert nach Technologien, durchgeführt werden, um Aussagen über Diversifikation und Anbieterkonzentration zu treffen. Auf Grundlage der Daten zu Industrie und Wertschöpfung kann die Komplexität und Einbettung bestimmter kritischer Technologien in die lokalen, bzw. regionalen Wertschöpfungsketten analysiert werden. Dazu besteht allerdings aktuell keine Datenbasis (siehe Teil B, Abschnitt 6).

Zusätzlich kann ein Monitoring der Versorgungssicherheit mit kritischen Ressourcen die Analyse ergänzen (siehe Teil B, Abschnitt 6). Des Weiteren lassen sich Aussagen über die Verlässlichkeit kritischer Handels- und Wirtschaftspartner mithilfe des Monitorings von Governance-Performanz und sozialer Entwicklung treffen (Teil B, Abschnitt 8). Besonders wichtig ist eine Bewertung bestehender Handelsbeziehungen mit entsprechenden Partnern. Hier spielen beispielsweise Zugehörigkeit zur Welthandelsorganisation (WTO), ergänzende bilaterale oder multilaterale Handels- und Investitionsabkommen mit der EU (wie bspw. der Energy Charter Treaty) sowie die Häufigkeit von Handelskonflikten mit den jeweiligen Partnern und der EU. Tabelle 19 bietet eine Übersicht über die Datengrundlagen für die Analyse wirtschaftlicher und technologischer Abhängigkeit.

| Dimension  | Datengrundlage  | Relevante Themenfelder des Monitoringkonzeptes   |
|--|---|--|
| Internationale Verfügbarkeit von Technologien                                    | Patentanalyse / Innovationslandschaft   | Forschung und Innovation (Teil B, Abschnitt 5)   |
| Kritikalität und Komplexität von Technologien innerhalb der Wertschöpfungsketten | Komplexität globaler / regionaler Produktions- und Wertschöpfungsketten   | Industrie und Wertschöpfung (Teil B, Abschnitt 6)  |
| Rolle von Technologieimporten  | Handelsdaten (Gruppiert nach Technologien)  | Industrie und Wertschöpfung (Teil B, Abschnitt 6)  |
| Rolle und Grad der Diversifikation von Rohstoffimporten                          | Handelsdaten kritischer Ressourcen, sowie importiertem klimafreundlichem Wasserstoff  | Industrie und Wertschöpfung (Teil B, Abschnitt 6)  |
| Verlässlichkeit relevanter internationaler Partner                               | Performanz von Governance und Institutionen, einschließlich Indikatoren zur Qualität und Institutionalisierung der Wirtschaftsbeziehungen | Governance und soziale Entwicklung (Teil B, Abschnitt 8), einschließlich Indikatoren zur Qualität und Institutionalisierung der Wirtschaftsbeziehungen |

Tabelle 19: Datenquellen für die Analyse wirtschaftlicher und technologischer Abhängigkeit

## Substitutionsmöglichkeiten

Alternativen (Substitute) zu kritischen Technologien entlang bestehender Wertschöpfungsketten, können die wirtschaftliche und technologische Souveränität erhöhen und Abhängigkeiten verringern. Es ist daher bei der Analyse der wirtschaftlichen und technologischen Souveränität notwendig einen umfassenden Einblick in die aktuellen technologischen Entwicklungen zu haben, wie das Monitoring der Forschung und Innovation vorsieht. Auf dieser Basis können vertiefende Analysen zu Anbieterkonzentration, Abhängigkeiten und tatsächliche Versorgungsrisiken durchgeführt werden.

Anhand der eigenen, und der Abhängigkeiten von externen technologischen Kompetenzen und Ressourcen, sowie vorhandener Substitutionsmöglichkeiten lässt sich der Grad der Technologiesouveränität bestimmen. Ergänzt um die Ergebnisse der Fokusanalyse der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen auf dem globalen Wasserstoffmarkt, lässt sich die wirtschaftliche und technologische Souveränität Deutschlands, bzw. der EU einschätzen. Die Ergebnisse stellen dabei keine abschließende Bewertung da, sondern sind vielmehr eine Einschätzung in Relation zu anderen Volkswirtschaften, die sich auch im Zeitverlauf ändern kann bzw. durch politische Interventionen auch beeinflusst werden kann (Edler et al., 2020, p. 19). Ein systematisches, kontinuierliches Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft schafft die Datengrundlage, um Entscheidungen zur Notwendigkeit und Fokussierung entsprechender Interventionen zu treffen.

# TEIL D: Schlussfolgerungen

Für diesen Bericht wurde eine erste Bestandsaufnahme verfügbarer Daten und Wissensquellen zur globalen Wasserstoffwirtschaft durchgeführt. Darauf basierend wurde ein erstes Konzept für das Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft vorgestellt. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden eine Reihe von Schlussfolgerungen und Ansätze für den Aufbau eines Monitorings der globalen Wasserstoffwirtschaft formuliert. Zunächst werden Anknüpfungspunkte für den Aufbau eines längerfristigen Monitoringprozesses auf der Basis des Konzeptes dargestellt. Darüber hinaus werden prioritäre Vorhaben zur Schließung von Wissenslücken identifiziert.

---

# 1. Umsetzung eines Monitoringprozesses

---

Das im Bericht vorgestellte Konzept für das Monitoring einer globalen Wasserstoffwirtschaft verfolgt das Ziel, eine Wissensbasis für die kontinuierliche Überprüfung und Weiterentwicklung der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik zu schaffen. Die Erstauflage eines Monitoringberichtes würde als Beschreibung der Ausgangslage dienen und wäre eine wichtige Grundlage, um einen systematischen Überblick des globalen Wasserstoffsektors zu erhalten. Wie im Bericht dargestellt, würde ein entsprechender Analyseprozess in einigen Bereichen vor allem die Aufbereitung und systematische Darstellung vorhandener Daten beinhalten. In anderen Bereichen würde es neue Datenerhebungen erfordern. Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente für die Schaffung eines umfassenden Monitoringprozesses skizziert.

## Kapazitäten und Netzwerke aufbauen

Für die Umsetzung des Monitoringkonzeptes müssen zudem notwendige Kapazitäten für die Erstellung der Monitoringberichte sowie zur Erhebung zusätzlicher Daten in einzelnen Themenfeldern geschaffen werden. Um eine optimale Nutzung vorhandener Datenquellen, bzw. um die Komplementarität zu vorhandenen Monitoringprozessen auf internationaler Ebene sicherzustellen, wäre zudem eine Zusammenarbeit mit dem FCHO Observatory sowie der IEA sinnvoll. Es wäre ein gegenseitiger Datenaustausch sowie ggf. eine Zusammenarbeit bei der Datenerhebung in einigen Teilbereichen sinnvoll. Ebenso sollten Kooperationen mit vorhandenen Initiativen in Deutschland aufgebaut werden. Für die Erhebung von Daten zu möglichen Exportländern, global und in Afrika, werden aktuell drei Verbundprojekte mit Unterstützung des BMBF bzw. des BMU durchgeführt. Dazu gehört auch das HyPat-Projekt unter Leitung des Fraunhofer ISI und unter Beteiligung des IASS. Diese Projekte können wichtige Datengrundlagen für das Monitoring schaffen und sollten im Verlauf eines möglichen Monitoringprozesses berücksichtigt werden.

## Monitoring im Rahmen der Energiepartnerschaften und -dialoge etablieren

Die Energiepartnerschaften der Bundesregierung und die damit verbundene Präsenz der Durchführungsorganisationen in wichtigen Vorreiterländern und potenziellen Produktionsländern bieten eine mögliche Basis für die Erhebung länderspezifischer Daten für das Monitoring einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Insbesondere in Bereichen, wo zu erwarten ist, dass sich der Sektor in den nächsten Jahren besonders dynamisch entwickeln wird, bietet das Netzwerk der Energiepartnerschaften ein großes Potenzial, um sehr zeitnah Trends zu erfassen, die für die Weiterentwicklung der deutschen Wasserstoffstrategie von großer Bedeutung sind. Dazu gehören unter anderem Fragen von Politik und Regulierung, Qualitäts- sowie Transportinfrastruktur. Ein entsprechendes Netzwerk wäre ansonsten kurzfristig nur sehr schwer zu entwickeln und würde eine umfangreiche Förderung erfordern. Über das Netzwerk der Energiepartnerschaften hingegen könnten Daten mit nur wenig Zusatzaufwand erhoben werden. Während das IASS Potsdam Erhebungen zu Politik, Regulierung und Qualitätsinfrastruktur auch im Rahmen des BMBF-geförderten HyPat-Projektes durchführen wird, würde eine Zusammenarbeit mit den Energiepartnerschaften die Möglichkeit bieten, eine weitaus umfassendere Datenbasis zu schaffen und ihre kontinuierliche Aktualisierung zu gewährleisten.

---

## 2. Potenzialanalyse zu Wettbewerbsfähigkeit, Wertschöpfung und Innovation

---

Wichtiger erster Schritt für das Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Wasserstoffindustrie ist die Durchführung einer Analyse der Potenziale verschiedener Technologien und Komponenten für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen deutschen bzw. europäischen Wasserstoffindustrie. Auf der Grundlage können sowohl Fortschritte in diesem Feld gemessen als auch politische Interventionen weiterentwickelt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen bzw. europäischen Wasserstoffindustrie zu fördern und um langfristige Potenziale für Wertschöpfung und Beschäftigung zu erschließen.

Elemente einer entsprechenden Analyse sollten sein:

### Ersterhebung der globalen Unternehmens- und Innovationslandschaft im Wasserstoffsektor

Eine Erhebung der Unternehmens- und Innovationslandschaft, wie in den Abschnitten Industrie und Wertschöpfung sowie Forschung und Innovation in Teil B des Berichtes dargelegt, dient als Grundlage für die Potenzialanalyse sowie für das zukünftige Monitoring der Industrieentwicklung im Wasserstoffsektor. Letzteres ermöglicht eine Nachverfolgung wichtiger Veränderungen in Bezug auf die Wertschöpfungsanteile verschiedener Länder und Regionen und bildet damit eine Basis, um Trends frühzeitig zu erkennen und damit Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung von innovations- und industriepolitischen Maßnahmen im Rahmen der deutschen und europäischen Wasserstoffpolitik zu identifizieren.

### Expert\*innenbasierte Potenzialanalyse

Die Analyse sollte zudem die Potenziale unterschiedlicher Technologien, Komponenten und den damit verbundenen Wertschöpfungsketten für die Entwicklung einer wettbewerbsfähigen deutschen bzw. europäischen Wasserstoffindustrie abschätzen. Eine solche Potenzialanalyse ermöglicht die Identifikation vielversprechender Felder für die verstärkte innovations- und industriepolitische Förderung.

### Modellbasierte Potenzialanalyse der Wertschöpfung und Beschäftigung

Aufbauend auf den Ergebnissen einer Expert\*innen-basierten Potenzialanalyse zu Wettbewerbsfähigkeit und Wertschöpfung wäre es möglich, eine modell-basierte Analyse von Beschäftigungspotenzialen durchzuführen. Diese Analyse würde im Unterschied zu vielen modell-basierten Analysen explizit technologie-basierte Faktoren berücksichtigen, um eine möglichst realistische Abschätzung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale zu ermöglichen.

---

# Literatur

---

- Andreasen, K. P., & Sovacool, B. K. (2015). Hydrogen technological innovation systems in practice: comparing Danish and American approaches to fuel cell development. *Journal of Cleaner Production*, 94, 359-368.
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2011). The hydrogen issue. *ChemSusChem*, 4(1), 21-36.
- Ashari, P. A., & Blind, K. (i.E.). An Analysis of the Three Knowledge and Technology Transfer Channels: Publications, Patents, Standards – The Case of Hydrogen Technology. EURAS 2021 Proceedings.
- Asheim, B. T., Isaksen, A., & Trippi, M. (2019). Advanced Introduction to Regional Innovation Systems. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 73, 318-319.
- Auktor, G. V., Altenburg, T., & Stamm, A. (2020). The Transition Towards a Green Economy and its Implications for Quality Infrastructure.
- Aurora Energy Research. (2021). European Hydrogen Market Attractiveness Report.
- Bax, P. (2020, 21.08.). Congo Hydrogen Plant Being Considered by European Turbine Makers. Bloomberg Law. Retrieved from <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/congo-hydrogen-plant-being-considered-by-european-turbine-makers>.
- Bhagwat, S. R., & Olczak, M. (2020). Green Hydrogen: Bridging the Energy Transition in Africa and Europe.
- Bhandari, R., Trudewind, C. A., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production*, 85, 151-163.
- Binz, C., Gosens, J., Hansen, T., & Hansen, U. E. (2017). Toward Technology-Sensitive Catching-Up Policies: Insights from Renewable Energy in China. *World Development*, 96, 418-437.
- Binz, C., Gosens, J., Yap, X.-S., & Yu, Z. (2020). Catch-up dynamics in early industry lifecycle stages—a typology and comparative case studies in four clean-tech industries. *Industrial and Corporate Change*, 29(5), 1257-1275.
- Blind, K., Mangelsdorf, A., & Pohlisch, J. (2018). The effects of cooperation in accreditation on international trade: Empirical evidence on ISO 9000 certifications. *International Journal of Production Economics*, 198, 50-59.
- Blind, K., Pohlisch, J., & Rainville, A. (2019). Innovation and standardization as drivers of companies' success in public procurement: an empirical analysis. *The Journal of Technology Transfer*, 45(3), 664-693.
- Bloomberg NEF. (2020). Hydrogen Economy Outlook.
- BMBF. (2021). Technologisch souverän die Zukunft gestalten: BMBF-Impulspapier zur technologischen Souveränität.
- Bundesregierung. (2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Christensen, A. (2020). Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe.
- Clougherty, J. A., & Grajek, M. (2008). The impact of ISO 9000 diffusion on trade and FDI: A new institutional analysis. *Journal of International Business Studies*, 39(4), 613-633.
- Crone, K., Friese, J., & Löhle, S. (2020). Sustainable Electricity Sources: Renewable fuels of non-biological origin in the RED II.
- E4Tech. (2019). Study on Value Chain and Manufacturing Competitiveness Analysis for Hydrogen and Fuel Cells Technologies. FCH contract 192. Evidence Report.
- E4Tech. (2020). The Fuel Cell Industry Review 2020.
- Elder, J., Blind, K., Frietsch, R., Kimpeler, S., Kroll, H., Lerch, C., . . . Walz, R. (2020). Technologiesouveränität: Von der Forderung zum Konzept.
- Element Energy. (2018). Hydrogen supply chain evidence base.

- ESYS, BDI, & dena. (2019). Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt!: Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland.
- FNB Gas. (2020). Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz (H2-Netz).
- Frontier Economics. (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende.
- Gas for Climate. (2021). The European Hydrogen Backbone vision. Retrieved from <https://gasforclimate2050.eu/ehb/>.
- Gazis, E. J., Shantanu; Martinez, Victor Andres. (2020). Hydrogen for a net zero GB. In an integrated energy market perspective: Aurora Energy Research.
- Glenk, G., & Reichelstein, S. (2019). Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*, 4(3), 216-222.
- Hausmann, R., Hidalgo, C. A., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A., & Yildirim, M. A. (2013). *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity* (2nd ed.). Cambridge: MIT Press.
- Holger, S., Jan, K., Petra, Z., Andrea, S., & Jürgen-Friedrich, H. (2017). The Social Footprint of Hydrogen Production - A Social Life Cycle Assessment (S-LCA) of Alkaline Water Electrolysis. *Energy Procedia*, 105, 3038-3044.
- Hughes, L., & Quitzow, R. (2018). Chapter 20: Low-carbon technologies, national innovation systems, and global production networks: the state of play. In A. Goldthau, M. F. Keating, & C. Kuzemko (Eds.), *Handbook of the International Political Economy of Energy and Natural Resources*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Hydrogen Council. (2020). Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective.
- Hydrogen Europe. (2020). Clean hydrogen Monitor 2020.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*.
- IEA. (2020). Hydrogen Project Database.
- IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*.
- IRENA. (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective*.
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*.
- Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., O'Mahony, T., & Dufour, J. (2015). Screening of socio-economic indicators for sustainability assessment: a combined life cycle assessment and data envelopment analysis approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(2), 202-214.
- Kurzweil, P., & Dietlmeier, O. K. (2018). *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Lee, K., & Malerba, F. (2017). Catch-up cycles and changes in industrial leadership: Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems. *Research policy*, 46(2), 338-351.
- Lundvall, B. (2007). National Innovation Systems: Analytical Concept and Development Tool. *Industry and Innovation*, 14, 95-119.
- Malhotra, A., & Schmidt, T. S. (2020). Accelerating Low-Carbon Innovation. *Joule*, 4(11), 2259-2267.
- Mayyas, A., Ruth, M., Pivovar, B., Bender, G., & Wipke, K. (2018). *Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers*.
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S., & Ulgiati, S. (2018). Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments*, 5(2).
- Merten, F., Scholz, A., Krüger, C., Heck, S., Girard, D. Y., Mecke, M., & Goerge, M. (2020). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung.
- Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(3), 255-271.
- Mirtsch, M., Kinne, J., & Blind, K. (2021). Exploring the Adoption of the International Information Security Management System Standard ISO/IEC 27001: A Web Mining-Based Analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68(1), 87-100.
- Nezzari, B., & Gomri, R. (2020). Study of cracking of methane for hydrogen production using concentrated solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 135-148.

- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13(1).
- NREL. (2018). H2A: Hydrogen Analysis Production Models. 2018 Case Study: Central Electrolysis.
- Pflugmann, F., & De Blasio, N. (2020). The Geopolitics of Renewable Hydrogen in Low-Carbon Energy Markets. *Geopolitics, History, and International Relations*, 12(1).
- Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J., & O'Brien, J. (2020). Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. *Progress in Nuclear Energy*, 123.
- Porter, M. E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. New York: Free Press.
- Power to X Allianz. (2020). Vorschlag der PtX Allianz zur Ausgestaltung und Gewichtung der Kriterien für den Netzstrombezug von Elektrolyseuren zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe nach Art. 27 der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II).
- Prognos. (2020). Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Quitrow, R., Huenteler, J., & Asmussen, H. (2017). Development trajectories in China's wind and solar energy industries: How technology-related differences shape the dynamics of industry localization and catching up. *Journal of Cleaner Production*, 158, 122-133.
- Ram, M., Galimova, T., Bogdanov, D., Fasihi, M., Gulagi, A., Breyer, C., . . . Crone, K. (2020). Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050.
- Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*, 200, 290-302.
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470-30492.
- Scita, R., Raimondi, P. P., & Noussan, M. (2020). Green Hydrogen: the Holy Grail of Decarbonisation? An Analysis of the Technical and Geopolitical Implications of the Future Hydrogen Economy.
- Shibata, Y., Matsumoto, T., Kan, S., Thomas, S., Gericke, N., & Nanning, S. (2020). Clean Hydrogen: Important Aspects of Production, International Cooperation, and Certification.
- Sinigaglia, T., Freitag, T. E., Kreimeier, F., & Martins, M. E. S. (2019). Use of patents as a tool to map the technological development involving the hydrogen economy. *World Patent Information*, 56, 1-8.
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE. (2021). Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa: Potenziale und Rahmenbedingungen für den Wasserstoffbedarf und -ausbau sowie die Preisentwicklungen für die Industrie.
- Surana, K., Dobliger, C., Anadon, L. D., & Hultman, N. (2020). Effects of technology complexity on the emergence and evolution of wind industry manufacturing locations along global value chains. *Nature Energy*, 5(10), 811-821.
- Szinai, J. K., Deshmukh, R., Kammen, D. M., & Jones, A. D. (2020). Evaluating cross-sectoral impacts of climate change and adaptations on the energy-water nexus: a framework and California case study. *Environmental Research Letters*, 15(12).
- Timpe, C., Seebach, D., Bracker, J., & Kasten, P. (2017). Improving the accounting of renewable electricity in transport within the new EU Renewable Energy Directive. Policy paper for Transport & Environment.
- Trinomics. (2020). Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy and Climate Plans.
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2021). Comparative life cycle sustainability assessment of renewable and conventional hydrogen. *Sci Total Environ*, 756, 144132.
- Weltenergieerat. (2020). International Hydrogen Strategies: A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany.
- Wietschel, M., Bekk, A., Breitschopf, B., Boie, I., Edler, J., Eichhammer, W., . . . Walz, R. (2020). Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten.

---

## Zu den Autor\*innen

---

### **Rainer Quitzow (IASS Potsdam)**

Dr. Rainer Quitzow ist Forschungsgruppenleiter und Sprecher des Forschungsbereiches Energiesysteme und gesellschaftlicher Wandel am IASS Potsdam. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf nachhaltiger Innovations- und Industriepolitik sowie Governance der globalen Energiewende. Vor seinem Einstieg in die Wissenschaft arbeitete Rainer Quitzow in der internationalen Entwicklungszusammenarbeit mit Fokus auf Governance, Umwelt- und Handelspolitik. Für die Weltbank (Washington DC) führte er Governance-Analysen und Folgenabschätzungen für nationale Entwicklungsprogramme in Lateinamerika und Afrika durch.

### **Joschka Jahn (IASS Potsdam)**

Joschka Nikolaus Jahn arbeitet seit Februar 2017 in der Forschungsgruppe „Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung“ am IASS Potsdam. Er forscht zu technisch-ökonomischen und politischen Dimensionen einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Sein Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung regionaler und internationaler Wertschöpfungsketten, sowie Fragen klimatischer und sozioökonomischer Nachhaltigkeit im stetig wachsenden Wasserstoff-Sektor.

### **Adela Marian (IASS Potsdam)**

Dr. Adela Marian arbeitet seit Februar 2011 am IASS und beschäftigt sich mit Themen rund um die Transformation des Energiesystems. Ihre aktuellen Forschungsschwerpunkte liegen auf Ausschreibungen für Solarenergie in Indien und den Auswirkungen einer entstehenden Wasserstoffwirtschaft auf die globale Energiewende. Von 2015 bis 2018 war sie wissenschaftliche Projektkoordinatorin des Demonstrationsvorhabens Demo 5 im Rahmen des EU-Projektes Best Paths. Demo 5 entwickelte ein supraleitendes Hochspannungskabel mit einer Leistung von drei Gigawatt, welches die Standards für eine Integration ins Stromnetz erfüllt.

### **Knut Blind (Fraunhofer ISI)**

Prof. Dr. Knut Blind leitet seit 2006 das Fachgebiet Innovationsökonomie an der Technischen Universität Berlin sowie seit 2019 das Geschäftsfeld Innovation und Regulierung am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Zwischen 2008 und 2016 hatte er auch den Stiftungslehrstuhl für Standardisierung an der Rotterdam School of Management der Erasmus Universität Rotterdam inne. Vor seiner Berufung an die Technische Universität Berlin war er über 10 Jahre am Fraunhofer ISI tätig.

### **Lorenzo Cremonese (IASS Potsdam)**

Dr. Lorenzo Cremonese ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe "Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung" am IASS Potsdam. Dr. Cremonese forscht zu Fragen von Erdgas, mit besonderem Schwerpunkt auf Methanlecks entlang der Produktionskette, sowie zur Rolle von Wasserstoff- und CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien im Rahmen der Energiewende. Er studierte Geowissenschaften an der D'Annunzio Universität in Chieti (Italien) und promovierte 2012 in Geochemie am University College London.

**Grace Kageni Mbungu (IASS Potsdam)**

Dr. Grace Mbungu ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am IASS Potsdam. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf sozialen Dimensionen des Zugangs zu Energie und Energietransformationen hin zu nachhaltiger Energie für alle, mit einem Fokus auf den Globalen Süden. Sie hat einen B.A. in Politikwissenschaften und Gender Studies sowie einen Master in Public Administration (MPA), mit Schwerpunkt Menschenrechte und internationale Entwicklung, von der Bowling Green State University, Ohio, USA. Sie hat an der Universität Stuttgart promoviert.

**Felix Neuner (Fraunhofer ISI)**

Felix Neuner arbeitet seit Juli 2020 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme im Geschäftsfeld Energiewirtschaft. Dort analysiert er mithilfe statistischer Methoden und agentenbasierter Modellierung das Zusammenspiel von Nutzerverhalten, alternativen Antrieben im Verkehr und Energiesystemen. Er hält die Vorlesungen Statistik, Lineare Algebra und Differenzialgleichungen an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg.

**Sonja Thielges (IASS Potsdam)**

Dr. Sonja Thielges ist seit August 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IASS. In der Forschungsgruppe „Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung“ beschäftigt sie sich mit der globalen Dimension der Energiewende. Schwerpunkte ihrer Arbeit sind die G20-Energie-Agenda, internationale Energiewendepolitik sowie die Klima- und Energiepolitik der USA. Sie hat an der Freien Universität im Fach Politikwissenschaften promoviert.

**Martin Wietschel (Fraunhofer ISI)**

Martin Wietschel arbeitet seit 2002 am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und ist dort seit dem Jahr 2020 Leiter des Competence Centers Energietechnologien und Energiesysteme. Seit 2008 ist er zudem außerplanmäßiger Professor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er hat seine Promotion und Habilitation mit dem Abschluss der *venia legendi* für Betriebswirtschaftslehre am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion der Universität Karlsruhe (heute: KIT) abgelegt.



## Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS)

Das IASS forscht mit dem Ziel, Transformationsprozesse hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft aufzuzeigen, zu befördern und zu gestalten, in Deutschland wie global. Der Forschungsansatz des Instituts ist transdisziplinär, transformativ und ko-kreativ: Die Entwicklung des Problemverständnisses und der Lösungsoptionen erfolgen in Kooperationen zwischen den Wissenschaften, der Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Gesellschaft. Ein starkes nationales und internationales Partnernetzwerk unterstützt die Arbeit des Instituts. Zentrale Forschungsthemen sind u.a. die Energiewende, aufkommende Technologien, Klimawandel, Luftqualität, systemische Risiken, Governance und Partizipation sowie Kulturen der Transformation. Gefördert wird das Institut von den Forschungsministerien des Bundes und des Landes Brandenburg.

### IASS Discussion Paper

Februar 2022

#### Kontakt:

Rainer Quitzow: [rainer.quitzow@iass-potsdam.de](mailto:rainer.quitzow@iass-potsdam.de)

#### Adresse:

Berliner Straße 130

14467 Potsdam

Tel: +49 (0) 331-28822-340

Fax: +49 (0) 331-28822-310

E-Mail: [media@iass-potsdam.de](mailto:media@iass-potsdam.de)

[www.iass-potsdam.de](http://www.iass-potsdam.de)

#### ViSdP:

Prof. Dr. Mark G. Lawrence,

Geschäftsführender Wissenschaftlicher Direktor

DOI: 10.48481/iass.2022.009

