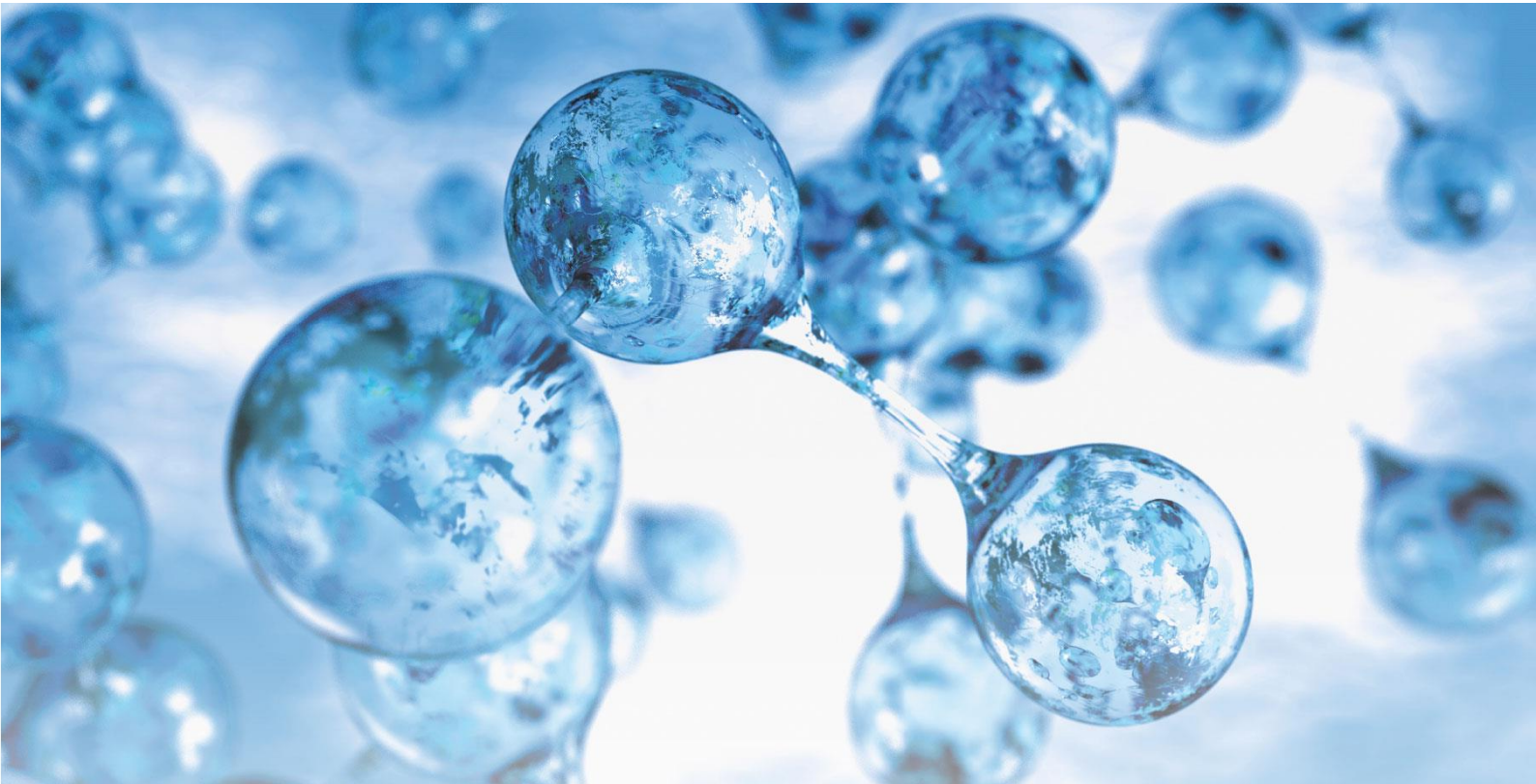


FICHTNER



Wasserstoff:

Das Handbuch für Investoren und Projektentwickler

Matthias Schlegel, Fichtner



Fichtner GmbH & Co. KG
Sarweystraße 3
70191 Stuttgart

www.fichtner-hydrogen.de



Autor

Matthias Schlegel
matthias.schlegel@fichtner.de

Fachbereichsleiter Wasserstoff
Fichtner GmbH & Co. KG

Rechtliche Hinweise

Das Ziel dieses Berichts ist es, allgemeine Zusammenhänge verständlich darzustellen. Die Entscheidung für eine konkrete Investition benötigt jedoch immer eine fundierte und spezifische Prüfung aller relevanten Umstände des Vorhabens. Diese kann und soll dieser Bericht nicht ersetzen. Vielmehr stellt er einen Ausgangspunkt für die eigenen Überlegungen zu einem konkreten Vorhaben dar. Daher haften weder Fichtner noch der Autor für die Entscheidungen, die auf Basis dieses Berichts getroffen werden. Gerne unterstützen wir Sie aber bei der Entwicklung Ihres konkreten Vorhabens.

Eine Weitergabe oder Veröffentlichung dieses Berichts, sowohl ganz oder in Teilen, ist nur mit Zustimmung des Urheberrechtsinhabers zulässig.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Der Investment-Case für Wasserstoff	9
2.1	Die Herausforderung einer klimaneutralen Zukunft	9
2.2	Löst mehr Strom aus Erneuerbaren Energien allein die Herausforderung der Dekarbonisierung?	10
2.3	Fazit	16
3	Wasserstoffmärkte	17
3.1	Übersicht	17
3.2	Industrie	19
3.3	Mobilität	21
3.4	Energetische Nutzung	22
4	Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette	24
4.1	Erzeugung (Upstream)	25
4.2	Transport und Verteilung (Midstream)	25
4.3	Weiterverarbeitung (Downstream)	26
5	Erzeugung von Wasserstoff (Upstream)	28
5.1	Überblick über die Produktionsarten von Wasserstoff	28
5.2	Wasserstoff aus Erdgas	32
5.2.1	Grauer Wasserstoff	32
5.2.2	Blauer Wasserstoff	33
5.2.3	Türkiser Wasserstoff	34
5.3	Grüner Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien	36
5.3.1	Technologieüberblick und Grundlagen	36
5.3.2	Alkalische Elektrolyse	38
5.3.3	Protonaustauschmembran-Elektrolyse: PEM-Elektrolyse	40
5.3.4	Festoxid-Elektrolyse (auch Hochtemperatur-Elektrolyse)	42
5.3.5	Fazit	44

5.4	Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseprojekten.....	46
5.4.1	Einflussfaktor: Auslastung der Anlage.....	46
5.4.2	Einflussfaktor: Stromkosten	47
5.4.3	Wasserstoffgestehungskosten	49
5.5	Projektbeispiele	50
6	Transport und Verteilung von Wasserstoff (Midstream)	52
6.1	Grundlagen	52
6.2	Interkontinentaler Schifftransport.....	54
6.2.1	Überblick und Diskussion der Wertschöpfungsketten	54
6.2.2	Transport von flüssigem Wasserstoff	56
6.2.3	Transport von grünem Ammoniak und grünem Methanol	58
6.3	Transport von Wasserstoff per Pipeline.....	59
6.3.1	Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz	59
6.3.2	Umstellbarkeit von Erdgas- auf Wasserstoffnetze	59
6.4	Verteilung von Wasserstoff auf der Straße.....	60
7	Weiterverarbeitung von Wasserstoff (Downstream)	62
7.1	Herstellung von grünem Ammoniak	63
7.2	Herstellung von grünem Methanol	65
7.3	Herstellung synthetischer Kraftstoffe	67
7.4	Direktabnehmer von Wasserstoff	69
8	Attraktive Projektideen.....	70
8.1	Projekttyp 1.....	71
8.2	Projekttyp 2.....	73
8.3	Projekttyp 3.....	76
8.4	Projekttyp 4.....	78
9	Schlusswort	80
10	Quellenverzeichnis	82

1 Einleitung

Die Welt hat höchst ambitionierte Ziele für die Dekarbonisierung. Im Pariser Klimaabkommen wurde eine weitgehende Klimaneutralität bis 2050 vereinbart. Dies bedeutet eine komplette Transformation unserer heutigen Wirtschaft hin zu einem nachhaltigen System – und das innerhalb von nur einer Generation. Länder und Staatenbünde haben daraus teilweise noch herausforderndere Zielsetzungen abgeleitet: Die Europäische Union beispielsweise möchte bis zum Jahr 2030, also innerhalb von knapp 10 Jahren, ihren CO₂-Ausstoß um 55 % reduzieren. Um die Tragweite dieses Ziels zu verstehen, hilft es, sich vor Augen zu führen, woher diese Emissionen kommen: Sie entstehen durch das Verbrennen fossiler Energieträger. Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55 % bedeutet also in erster Näherung, circa 55 % der Wertschöpfungskette fossiler Energieträger fundamental zu transformieren. Die Dimension dieses Vorhabens ist gigantisch: Allein der Markt für diese Energieträger beträgt in der EU hunderte Milliarden Euro im Jahr. Die Transformation der Wertschöpfungskette fossiler Energieträger endet aber nicht bei diesem Marktvolumen. Hinzu kommt eine benötigte Infrastruktur für alternative Energieträger in Form von Stromnetzen, Wasserstoffnetzen, Ladesäulen, Wasserstofftankstellen und Energiespeichern. Dieser Teil der Wertschöpfungskette macht die Investition vieler zusätzlicher Milliarden pro Jahr nötig, um die alternativen Energien den Nutzern verfügbar zu machen. Und schließlich auch für die Verbraucher selbst: Einige bestehende Anwendungen können theoretisch alternative Energieträger direkt nutzen. So können beispielsweise Verbrennungsmotoren durch synthetische Kraftstoffe CO₂-neutral angetrieben werden. Andere Anwendungen erfordern eine teilweise Umstellung. So müssten beispielsweise Heizkessel für die Nutzung von Wasserstoff angepasst werden. Und schließlich gibt es diejenigen Anwendungen, die sich fundamental transformieren müssen, um klimafreundlich arbeiten zu können, wie z. B. die Rohstahlerzeugung. Dieser letzte Teil der Wertschöpfungskette fossiler Energieträger ist ebenfalls ein Markt, in dem jährlich viele Milliarden Euro umgesetzt werden.

Wasserstoff wird hierbei als Ersatz für die fossilen Energieträger in vielen Bereichen gesehen. Damit ist Wasserstoff ein Schlüsselement dieses Vorhabens, bei dem – um das gesteckte CO₂-Ziel zu erreichen – jährlich mehrere hundert Milliarden Euro allein in der EU umgesetzt werden müssen. Dabei ist der „Rockstar unter den Erneuerbaren Energien“, wie EU-Kommissar Frans Timmermans das kleinste Molekül in unserem Universum nennt, keinesfalls eine neue Idee als Energieträger: Bereits Jules Verne prognostizierte im Jahr 1870, dass Wasserstoff einmal die Welt mit Energie versorgen würde:

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“ (Jules Verne, „Die geheimnisvolle Insel“)

Für Investoren stellt sich im Bereich Wasserstoff dadurch eine faszinierende und zugleich schwierige Aufgabe: Auf der einen Seite ist ein Markt erkennbar, der in seiner Größe und vor allem in seiner von politischer Seite prognostizierten Entwicklungsgeschwindigkeit, eine der größten Gelegenheiten der Menschheitsgeschichte ist. Wann sonst wurde innerhalb eines Jahrzehnts ein Markt geschaffen, der im Bereich hunderter Milliarden Euro pro Jahr liegt? Andererseits wurde Wasserstoff fast schon regelmäßig über die Jahrzehnte als Energieträger der Zukunft gefeiert, um dann wieder in der Versenkung zu

verschwinden. Investoren stehen damit vor dem Dilemma zu entscheiden, ob die Zukunft von Wasserstoff wieder einmal Science-Fiction à la Kapitän Nemo ist oder ob sich hier gerade ein Markt entwickelt, an dem eine Beteiligung lohnend und vielleicht für manche Marktbeteiligte unverzichtbar ist. Darüber hinaus ist für eine Investition zu beurteilen, ob die Prognosen von Politik und Forschung zur Geschwindigkeit und zum Markthochlauf von Wasserstoff zutreffend sind oder nicht.

Es ist also eine herausfordernde und spannende Zeit für alle, die sich mit Energie, der Dekarbonisierung und vor allem mit Wasserstoff beschäftigen. Ich habe das Glück und das Privileg, in dieser aufregenden Zeit eines der weltweit führenden unabhängigen Beratungsteams im Bereich Wasserstoff zu leiten, das über viele Jahrzehnte Erfahrung in der praktischen Umsetzung von Wasserstoffprojekten verfügt. Dadurch hatte ich in den letzten Jahren die Gelegenheit, hunderte Gespräche mit potenziellen Investoren im Bereich Wasserstoff zu führen: Von Privatpersonen, über Asset Manager bis hin zu Projektentwicklern und Anlagenbetreibern. Das Interesse an Wasserstoff ist dabei nicht nur auf einige wenige Länder beschränkt, sondern global vorhanden. Dies ermöglichte es mir, mich mit Menschen aus allen Teilen der Welt – von Chile bis Australien, von Norwegen bis Südafrika – über deren Blick auf Wasserstoff und deren Erwartungen auszutauschen. Die Fragen, die sich die meisten von ihnen stellen, sind dabei sehr ähnlich: Ist die Technologie reif? Wird es in der Zukunft einen Markt für Wasserstoff geben, sodass sich eine Investition lohnt? Wie kann ich an der Zukunft von Wasserstoff partizipieren? Wie erreiche ich ein rentables Projekt und damit ein wirtschaftlich sinnvolles Investment? Und natürlich: Wasserstoff wurde schon oft ein großes Potenzial zugeschrieben, aber nie schaffte er den Durchbruch als Energieträger – wird es dieses Mal anders sein und was ist anders als bisher? Die grundsätzlichen Antworten auf diese Fragen sind immer dieselben. Natürlich variieren die individuelle Ausgestaltung und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen. Die grundlegenden Dynamiken, das Verständnis der Treiber sowie die Hemmnisse von Wasserstoff im Allgemeinen und Wasserstoffprojekten im Konkreten, verändern sich jedoch nicht.

Die beschriebenen, großen Herausforderungen zu meistern und die Dekarbonisierung nicht nur zu erreichen, sondern zu einem wirtschaftlichen Erfolg zu machen, wird nicht gelingen, wenn wir alle die gleichen Fragen nur für uns selbst beantworten. Fehlendes Wissen in einem für viele Beteiligte neuen Feld wie Wasserstoff kann zu Fehlinvestitionen, zu gescheiterten Projekten und vor allem zu verspätetem Handeln führen. Dies können wir uns als Gesellschaft angesichts des immer deutlicher sichtbaren Klimawandels und der hohen Ziele, die wir uns gesetzt haben, nicht mehr leisten.

Daher habe ich mich entschlossen, dieses Handbuch zu schreiben: Teil der Aufgabe von mir und meinen Kollegen ist es, Investoren bei ihren Vorhaben zu beraten. Dabei haben wir uns über Jahre damit beschäftigt, Lösungen für die Herausforderungen von Wasserstoffprojekten von der Politikberatung bis zum Anlagenbau zu finden. Sicherlich haben wir dabei nicht alle Fragen beantwortet, die es gibt. In jedem Gespräch, das ich führe, lerne ich etwas Neues dazu. Das macht die Arbeit im Bereich Wasserstoff in dieser Zeit so faszinierend. Wir sind aber sicher, die grundlegenden, immer wiederkehrenden Probleme und Fragen, die sich Investoren im Bereich Wasserstoff stellen, oft genug gehört, durchdacht und diskutiert zu haben, sodass wir hier einen Mehrwert bieten können.

Die Zeit drängt: Der Klimawandel ist harte Realität, immer mehr Kipp-Punkte werden erreicht. Gesellschaft und Politik haben sich ambitionierte Ziele gesetzt, um unsere Welt lebenswert zu erhalten und nachhaltiges Wirtschaften zu erreichen. Die Industrie und Finanzwirtschaft müssen nun liefern. Daher habe ich mich entschlossen, anstatt unser Wissen individuell zu vermitteln, es in diesem Handbuch einer

breiteren Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Es soll das Grundwissen vermitteln, das es benötigt, um Projektideen im Bereich Wasserstoff beurteilen und erfolgreiche Investitionen angehen zu können.

Ich hoffe dadurch, mögliche Investoren in ihrem Findungs-, Entwicklungs- und Entscheidungsprozess schnell und effizient voranbringen zu können. Damit sollen Sie, lieber Leser, nach der Lektüre dieses Handbuchs die Antworten auf die Fragen haben, die sich viele andere Menschen und Organisationen in derselben Situation auch schon gestellt haben. So soll dieses Handbuch einen Beitrag leisten, die Welt auf ihrem Weg in die Nachhaltigkeit voranzubringen.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und viel Erfolg für Ihre Vorhaben!

2 Der Investment-Case für Wasserstoff

2.1 Die Herausforderung einer klimaneutralen Zukunft

Im Pariser Klimaabkommen wurde das Ziel der Klimaneutralität vereinbart. Staaten und Staatenbünde haben daraufhin ihre eigenen Klimaziele entwickelt und teils bereits in Gesetze umgesetzt. Gemeinsam haben viele von ihnen das Ziel, eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Hierzu ist eine weitgehende Vermeidung von CO₂-Emissionen notwendig. Diese Herausforderung bedingt eine tiefgreifende Transformation der Wirtschaft: Wie Abbildung 1 zeigt, tragen viele Sektoren zu den heutigen Treibhausgasemissionen bei. So verursacht laut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) die Strom- und Wärmeerzeugung lediglich circa ein Viertel der gesamten Treibhausgasemissionen. Dieser Sektor ist gleichzeitig im Rahmen des bestehenden Systems am einfachsten zu dekarbonisieren. Durch die stetig steigende Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien ist er auch bereits einen guten Schritt auf dem Weg zur CO₂-Neutralität vorangekommen.

Für die weiteren großen Verursacher von Treibhausgasemissionen (Land- und Forstwirtschaft, Transport und Industrie), welche gemeinsam mehr als 60 % der weltweiten Treibhausgasemissionen ausmachen, fehlt jedoch noch eine Strategie und ein klarer Weg zur Dekarbonisierung. Sollen die Klimaziele der Staaten ganz oder auch nur zu einem guten Teil erreicht werden, werden neben dem Strom- und Wärmesektor auch diese Sektoren einer fundamentalen Transformation unterworfen sein.

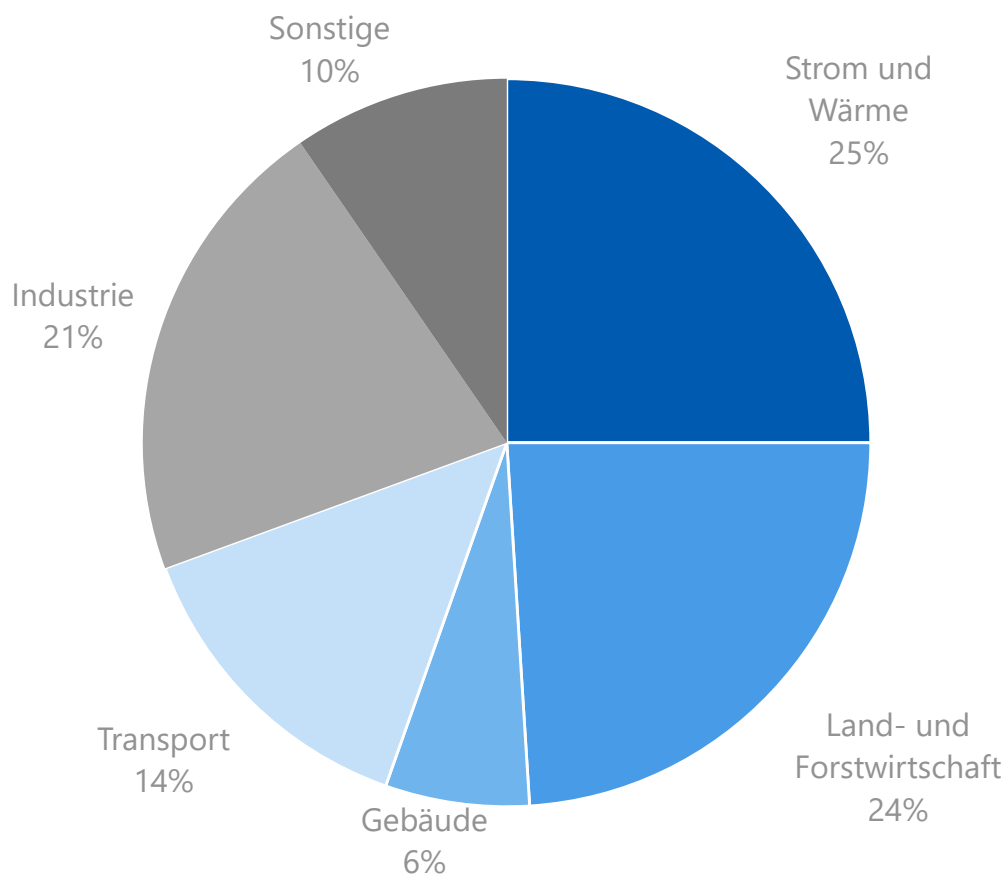


Abbildung 1: Anteil der Wirtschaftssektoren an den weltweiten Treibhausgasemissionen (IPCC, 2014)

Das Ziel nachhaltigen Wirtschaftens wurde, genau wie Wasserstoff als Energieträger, über Jahrzehnte oft propagiert. Die Voraussetzungen sind heute jedoch fundamental anders als sie es noch vor ein bis zwei Jahrzehnten waren. Vier Faktoren treiben heute die Entwicklung stärker als jemals zuvor in der Geschichte der Menschheit voran:

- Klimawandel: Die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung leitete sich lange Zeit aus Prognosen zur Erderwärmung ab. Inzwischen ist der Klimawandel deutlich spürbar.
- Öffentliches Bewusstsein: Die Gesellschaft erwartet von Industrie und Politik Handeln zur Begrenzung der Erderwärmung. Der Druck auf Entscheidungsträger nimmt hier stetig zu.
- Günstige Erneuerbare Energien: Die Kosten der Stromproduktion aus Wind und Solarenergie haben sich in den letzten beiden Jahrzehnten drastisch reduziert. An manchen Orten liegen sie bereits deutlich unter den Kosten der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern.
- Verfügbarkeit von Kapital: Geld für nachhaltige Investitionen steht in einem großen Ausmaß zur Verfügung. Nachhaltigkeitsaspekte fließen darüber hinaus in viele Investitionsentscheidungen ein.

Die Randbedingungen für eine Dekarbonisierung der Wirtschaft sind also günstig. Und sie sind anders als beim letzten Wasserstoff-Hype der 1990er Jahre.

2.2 Löst mehr Strom aus Erneuerbaren Energien allein die Herausforderung der Dekarbonisierung?

Oftmals diskutiert wird eine vollständige Elektrifizierung aller Sektoren der Wirtschaft, ein sogenanntes „all electric“-Szenario, als Lösung für die Dekarbonisierung der Welt. Die dahinterstehende Überlegung ist folgende: Die Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien basiert auf bekannten, marktreifen Technologien. Das Ziel wäre nun, diese CO₂-neutral erzeugte elektrische Energie in allen Sektoren zu nutzen, die bisher fossile Energieträger verbrennen. Damit ergäbe sich ein Weg zur Dekarbonisierung, der auf Erzeugungsseite auf marktreifen Technologien beruht. Ein Beispiel hierfür ist die Elektromobilität: Durch Nutzung von Batteriefahrzeugen substituiert Strom, der aus Erneuerbaren Energien erzeugt wurde, Benzin.

Sollte sich ein „all electric“-Szenario entwickeln, würde der Rohstoff Wasserstoff nicht weit über das aktuelle Maß hinaus benötigt werden. Daher ist es essenziell zu verstehen, wie wahrscheinlich die Entstehung eines „all electric“-Szenarios ist, um ein Verständnis für die Zukunftschancen des Wasserstoffmarktes zu entwickeln.

Dazu ist es wichtig, zunächst ein Verständnis für die Herausforderungen einer zukünftigen klimaneutralen Energieversorgung - ob Wasserstoff, „all electric“ oder eine andere Möglichkeit - zu entwickeln. Diese Herausforderungen sind:

- Herausforderung 1: Energiemengen
- Herausforderung 2: Energieform
- Herausforderung 3: Energieverfügbarkeit

8 Attraktive Projektideen

Eine wichtige Frage, die sich Investoren stellen, ist, wie ein attraktives Projekt identifiziert bzw. entwickelt werden kann. In gängigen Bereichen, wie z. B. der Entwicklung von Erneuerbare Energien-Projekten in den Bereichen Wind und PV, sind sinnvolle Rahmenbedingungen und Projekttypen bestens bekannt. In einem neuen Sektor wie Wasserstoff fehlt vielen Interessierten jedoch ein geeigneter Referenzrahmen, um die vielfältigen Möglichkeiten auf eine attraktive Situation hin zu untersuchen bzw. sich bietende Projektmöglichkeiten schnell einzuordnen.

Dieses Handbuch hat den Anspruch, Antworten auf häufig gestellte Fragen im Bereich Wasserstoff zu geben. Aus meiner Erfahrung in der Beratung im Bereich Wasserstoff ist die häufigste Frage die, wie man ein lohnendes Projekt erkennen kann. Daher ist es mir ein wichtiges Anliegen, diese Frage in diesem Kapitel so allgemeingültig wie möglich zu beantworten. Die Herausforderung der Allgemeingültigkeit bringt es mit sich, dass Vereinfachungen getroffen werden und manche Zwischentöne und Randaspekte nicht behandelt werden können. Aus meiner eigenen Erfahrung heraus bin ich jedoch überzeugt, dass der Referenzrahmen, den ich hier vorstelle, wertvoll ist. Ich nutze ihn selbst jedes Mal, wenn ich über Projekte in den Nachrichten lese oder wenn ich mit Kunden zum ersten Mal über ihre individuellen Projektideen spreche. Für mich bietet er einen guten Startpunkt zur Einordnung oder zur Ideenentwicklung und ich hoffe, dass er auch Ihnen eine wertvolle Unterstützung dabei ist, Klarheit in die Welt des Wasserstoffs zu bringen.

Ein erfolgreiches Produkt benötigt einen Vorteil gegenüber seinen Wettbewerbern. Ein Projekt für das Produkt Wasserstoff ist in meiner Denkweise daher erfolgsversprechend, wenn es gegenüber seiner Konkurrenz einen Vorteil besitzt. Deshalb basiert mein Referenzrahmen bei der Beurteilung von Projektideen darauf, ihren klar identifizierbaren, spezifischen Vorteil zu suchen. Mit dem Verständnis der drei Teile der Wasserstoffwertschöpfungskette aus den vorangegangenen Kapiteln lassen sich damit vier Projekttypen identifizieren. Diese entsprechen meinem Verständnis vieler selbst durchgeführter und am Markt beobachteter Projekte. Ich überprüfe all die Projekte, die mir in meiner Arbeit oder beim Lesen begegnen, stets darauf, ob sie einem der vier genannten Projekttypen entsprechen. Und bisher passten diejenigen, die sich gut entwickelten, bisher ausnahmslos in eine der vier Kategorien. Die vier Projekttypen beruhen auf der Nutzung spezifischer Vorteile entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette. Daher erwarte ich nicht, dass sich die Sinnhaftigkeit dieses Referenzrahmens ändern wird, solange kein fundamentaler Wandel eintritt. Beispiele hierfür könnten z. B. sein: das Verbot einer Technologie in einem Land, bisher nicht absehbare technische Neuerungen oder regulatorische Neuentwicklungen wie heimische Wasserstoffquoten, die den Import blockieren. Aus heutiger Sicht sind solche Entwicklungen jedoch für mich nicht zu erkennen.

Im Folgenden sind nun die vier attraktivsten Projekttypen dargestellt. Es gibt inzwischen zahlreiche erfolgreiche Wasserstoffprojekte. Für jeden Projekttyp zeige ich daher auch konkrete Beispiele aus der Praxis, die aus öffentlichen Quellen nachvollziehbar sind. Neben einer kurzen Beschreibung der Rahmenbedingungen erläutere ich ihre Vorteile und Erfolgsfaktoren. Ich hoffe, dies ermöglicht ein gutes Verständnis der dargestellten Prinzipien und macht es möglich, Parallelen zu den eigenen Vorhaben zu ziehen. Zudem sollen meine Ausführungen zeigen, dass Wasserstoffprojekte durchaus eine Sache Gegenwart sind – und keine Zukunftsmusik.