

# INVESTORENTYPEN UND RAHMENBEDINGUNGEN FÜR INVESTITIONEN IN DIE ERZEUGUNG GRÜNEN WASSERSTOFFS IN DEUTSCHLAND

Lars HOLSTENKAMP<sup>1</sup>, Christian KRIEL<sup>1</sup>, Lea-Marie ROKITTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH, Wichernstraße 34, Eingang B, 21335 Lüneburg, +49 4131 898595-7, lars.holstenkamp@ecolog-institut.de, www.ecolog-institut.de

## **Kurzfassung:**

Eine zentrale Zielstellung des Forschungsprojekts NoRaLock-H<sub>2</sub> ist die Modellierung des Entscheidungsverhaltens möglicher Investoren in H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen im agentenbasierten Energiesystemmodell AMIRIS. Diese Modellierung erfolgt auf Basis von im Rahmen des Projekts erhobenen empirischen Daten zu den politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die das Investitionsverhalten der Akteure am Wasserstoffmarkt prägen. Die im deutschen Wasserstoffmarkt identifizierten Akteurstypen werden hinsichtlich verschiedener investitionsrelevanter Eigenschaften charakterisiert. Grenzen der Abbildung im agentenbasierten Modell werden diskutiert. Die Auswirkungen verschiedener Rahmenbedingungen auf Investitionsentscheidungen für H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen in verschiedenen aus der Literatur bekannten Marktphasen werden beschrieben.

**Keywords:** Entscheidungsverhalten, ABM, Investorentypen, Wasserstoffinvestments

## **1 Einleitung**

Grünem Wasserstoff (H<sub>2</sub>) wird in vielen Szenarien für die Transformation des Energiesektors hin zu Treibhausgasneutralität eine wichtige Rolle beigemessen [1], [2], insbesondere für die Defossilisierung der Industrie und des Verkehrs [3]. Die Infrastruktur für Erzeugung, Transport und Verwendung von grünem Wasserstoff in Deutschland steht jedoch bislang noch am Anfang. Es stellt sich die Frage, wie sichergestellt werden kann, dass der Weg zu einer kosteneffizienten und nachhaltigen Wasserstoffherstellungsstruktur richtungssicher beschritten wird und es keine Lock-in-Effekte durch Investitionen in nicht zukunftsfähige Technologien gibt [4], [5], [6]. Dieser Frage wird im Forschungsprojekt NoRaLock-H<sub>2</sub> nachgegangen. Hierzu wird auf ein optimierendes und ein agentenbasiertes Energiesystemmodell zurückgegriffen, um potenzielle Lock-in-Effekte und richtungssichere Pfade zu identifizieren. Für das agentenbasierte Modell (ABM) AMIRIS müssen Eingangsdaten definiert werden, um das Investitionsverhalten der relevanten Agenten abzubilden. Daher stellt sich die Frage, welche relevanten Akteure sich auf den deutschen Wasserstoffmärkten identifizieren lassen und was die wesentlichen Charakteristika des Entscheidungsverhaltens dieser Akteure sind. Zudem wird im vorliegenden Beitrag auch der Frage nachgegangen, welche dieser Befunde über das Investitionsverhalten sich (gut) in einem ABM abbilden lassen. Darüber hinaus gilt es, die wesentlichen ökonomischen, sozialen und rechtlichen Rahmenbedingungen für Wasserstoffinvestments und die Wirkungen dieser Rahmenbedingungen auf die Wasserstoffinvestments zu identifizieren. Dies ist der zweite Fragenkomplex, der in der vorliegenden Arbeit diskutiert wird.

Im Folgenden wird zunächst kurz die Methodik der Untersuchung beschrieben. Daran schließen sich Ausführungen zum ersten Fragenkomplex, also den Investorentypen und deren Abbildung in AMIRIS, an. Im vierten Abschnitt werden sodann die Befunde zu den Rahmenbedingungen für Wasserstoffinvestitionen in Deutschland dargestellt und diskutiert. Der Beitrag schließt mit einem kurzen Fazit.

## **2 Methodik**

Die Arbeit basiert auf einer Kombination qualitativer und quantitativer Methoden (Zwei-Phasen-Mixed-Methods-Design [7]): Leitfadengestützte Interviews und eine standardisierte Befragung dienten der parallelen Erfassung unterschiedlicher Aspekte des Investitionsverhaltens, des institutionellen Rahmens und der darüber hinausgehend relevanten Rahmenbedingungen. Ergebnisse aus diesen Datenerhebungen wurden bei insgesamt drei Onlineveranstaltungen vorgestellt und mit Stakeholdern aus der deutschen Wasserstoffbranche diskutiert bzw. validiert.

Im Rahmen von zwölf leitfadengestützten Interviews wurden potenzielle Investoren bezüglich ihres Investitionsverhaltens und der Rahmenbedingungen befragt. Die Interviews wurden als Videotelefonate geführt, aufgezeichnet und mit der Software QualCoder kodiert und analysiert. Mit Hilfe des Online-Umfragetools LimeSurvey wurden Ende 2024 standardisiert Informationen von Investoren erhoben. Zielgruppe waren Unternehmen, die bereits in Wasserstoffherstellungsanlagen investiert hatten oder über konkrete Investitionspläne verfügten. Nicht zuletzt dadurch war der Rücklauf insgesamt relativ klein ( $n = 39$ ). Die standardisierte Befragung diente im Wesentlichen der Quantifizierung unterschiedlicher Parameter im ABM. Wegen der relativ kleinen Zahl an Rückläufen wurden ergänzend Sekundärdaten für die Quantifizierung herangezogen, sofern diese verfügbar waren. Die Ergebnisse der qualitativen Interviews und der standardisierten Befragung wurden in zwei Online-Workshops mit dem Industriebeirat und einem regionalen Wasserstoffnetzwerk zur Diskussion gestellt. Die Workshops dienten der Überprüfung und Kontextualisierung der Ergebnisse sowie der Vertiefung einzelner Fragen. Die Gesamtergebnisse wurden dann erneut bei einer Onlineveranstaltung vorgestellt, aktualisiert und kontextualisiert.

## **3 Investorentypen**

### **3.1 Literaturüberblick**

Es gibt mehrere Publikationen, in denen Typologien der Akteurslandschaften des Wasserstoffmarktes in anderen europäischen Ländern wiedergegeben werden [8], [9]. Da sich die Akteursstrukturen der Energiesektoren in einzelnen Ländern sehr stark voneinander unterscheiden, kann eine Akteurstypologie, die für ein bestimmtes Land entwickelt worden ist, allerdings nicht einfach für ein anderes Land übernommen werden. Für Deutschland liegen ebenfalls einige wenige Arbeiten vor [10], [11], [12], [13]. Für das ABM werden der Modelllogik nach lediglich diejenigen Akteure abgebildet, die selbst in Wasserstoffherstellungsanlagen, primär Elektrolyseure, investieren. Politikprozesse und Rahmenbedingungen werden nicht modellendogen bestimmt. Keine der Akteurstypologien für den deutschen Wasserstoffmarkt fokussiert allerdings auf Investorentypen. Daher wurde für das Projekt eine eigene Typologie entwickelt.

Bei den Unternehmen wird in der Regel nach (Haupt-)Tätigkeiten entlang der Wertschöpfungsstufe unterschieden, im vorliegenden Fall also Anlagenhersteller, Projektentwickler, Finanzierer, Energieversorger, Abnehmer und ggf. eine Restkategorie („Sonstige“). Einen relevanten Einfluss auf Innovationsverhalten und Investitionsentscheidungen haben zudem [14]: die Art des Eigentümers (öffentlich vs. privat, ggf. zivilgesellschaftlich/Dritter Sektor und/oder hybrid); die Unternehmensgröße (kleine und mittlere Unternehmen [KMU] bzw. Mittelstand vs. Großunternehmen); das Unternehmensalter (Start-ups vs. etablierte Unternehmen); die Börsennotierung (börsennotiert vs. nicht börsennotiert) und die Art des Managements (inhabergeführt bzw. Familienunternehmen vs. managergeführt). Theoretisch ergeben sich daraus mit einfacher Kombinatorik 16 mögliche Subtypen pro Wertschöpfungsstufe. Selbst wenn nicht jede dieser Kombinationen in der Realität, d. h. im deutschen Wasserstoffmarkt, anzutreffen sein dürfte, liefert ein solches theoriebasiertes deduktives Vorgehen eine große Zahl an möglichen Agenten für das ABM. Unterscheiden sich diese nur geringfügig voneinander in den für das Modell relevanten Eigenschaften, ist der Erkenntnisgewinn aus einer solchen – wiewohl „realistischen“ – Differenzierung jedoch gering. Dafür steigen Modellierungsaufwand, Hardwareanforderungen und Modellkomplexität. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel bei der agentenbasierten Modellierung und Simulation, die Zahl der unterschiedlichen Agenten möglichst klein zu halten [15].

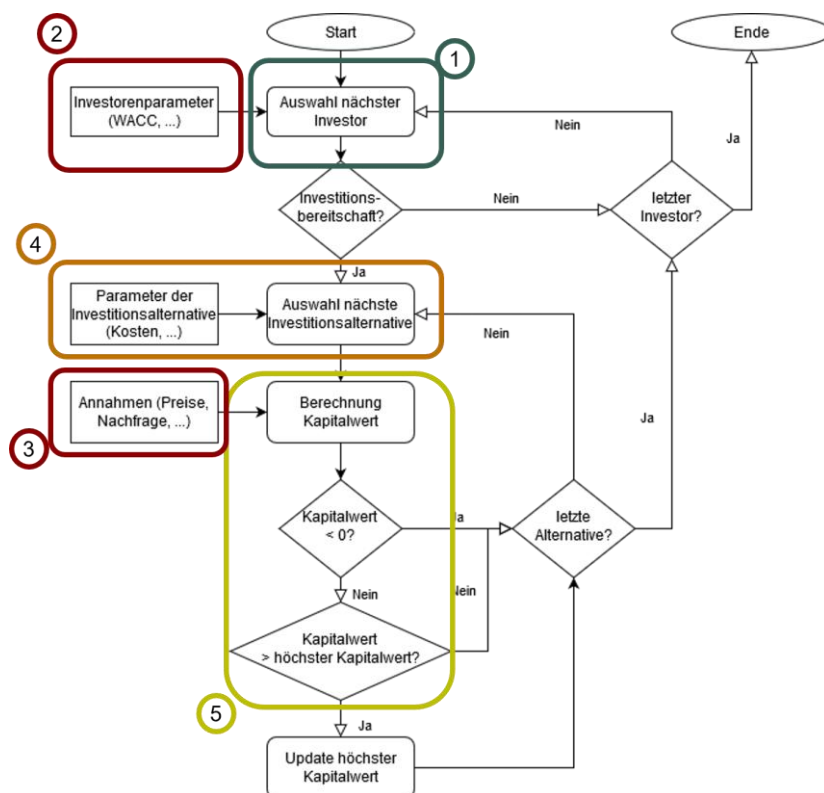


Abbildung 1: Investitionslogik in AMIRIS und Informationsbedarf zu den Agenten (Quelle: DLR, mit eigenen Ergänzungen)

### 3.2 Anforderungen des ABM und generelle Modelllimitationen

Das ABM AMIRIS verfügt über ein Investitionsmodell, in dem die Investitionsentscheidungen der Agenten abgebildet werden (Abbildung 1) [16]. Für jeden Agenten (grün/Nr. 1 im Prozessdiagramm in Abbildung 1) werden folgende Informationen benötigt:

- Informationen zur Risikoneigung, ausgedrückt in einem Zuschlag auf den Diskontierungssatz (Risikoprämie; Nr. 2 in Abbildung 1), zudem Daten zur Finanzierungsstruktur der Projekte
- Daten zum Umgang mit Unsicherheiten hinsichtlich der Strompreise und -mengen (Input für die Elektrolyse) sowie der H<sub>2</sub>-Nachfrage und -Marktpreise (Output) (Nr. 3 in Abbildung 1)
- Investitionsstrategien bzw. Ausschlusskriterien bei der Wahl der Investitionsobjekte (z. B. nur grüner Wasserstoff, d. h. Wasserstoff aus Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien; Nr. 4 in Abbildung 1)
- Entscheidungsgrößen bei der Investitionsentscheidung, in Abbildung 1 für den Fall der Kapitalwertmethode dargestellt (Nr. 5)
- Kapitalausstattung bzw. Budgetrestriktionen und Zahl der Investoren pro Typ, um Investitionsbudgets für die Agenten zu bestimmen (vgl. „Investitionsbereitschaft“ in Abbildung 1)

Die Entwicklung der Kosten in Form von Lernkurven, die Marktverteilung der aktiven Akteure und die damit verbundenen Unsicherheiten hängen zumindest teilweise mit der Marktentwicklung zusammen und sind daher grundsätzlich modellendogen – diese Größen werden nicht unabhängig bestimmt, sondern würden sich aus den Interaktionen der Akteure und den Marktbedingungen dynamisch ergeben. Lernkurven werden im vorliegenden ABM nicht explizit dargestellt. Sie werden weder exogen vorgegeben noch endogen modellintern entwickelt, weshalb diese dynamischen Rückkopplungseffekte bislang nicht berücksichtigt werden. Im Prinzip wäre es denkbar, Lernkurven und deren Einfluss auf Kosten und Investitionsentscheidungen modelltechnisch einzubeziehen, um die Abhängigkeit von der Marktentwicklung und die Entwicklung der Akteurslandschaft stärker endogen darzustellen.

Eine weitere Limitation besteht darin, dass die Wasserstoffnachfrage modellexogen vorgegeben wird, abgeleitet aus vorhandenen Studien zu Nachfrageszenarien. Unsicherheiten bzgl. der Nachfrage können damit im Modell nicht abgebildet werden. Zudem fehlt ein Feedback für die Agenten, wenn das Investitionsbudget nicht limitierend wirkt. Vor diesem Hintergrund ist ein vereinfachter Ansatz zur Festlegung der aggregierten Investitionsbudgets sinnvoll, der auch aufgrund von begrenzter Datenverfügbarkeit notwendig war: Zwar wurden im Rahmen der standardisierten Befragung Daten zu Investitionsbudgets erhoben, die einzelnen Akteuren für Wasserstoffinvestitionen zur Verfügung stehen. Auch geben die qualitativen Interviews Hinweise auf mögliche Projektgrößen, die einzelne Akteure finanzieren und umsetzen können. Allerdings können nur mit relativ hohem Aufwand Daten zur Zahl an Akteuren pro Typ ermittelt werden, um aggregierte Investitionsbudgets zu bestimmen – erst recht, wenn es nicht nur um heute auf dem H<sub>2</sub>-Markt (potenziell) tätige Unternehmen geht, sondern die Zahl in die Zukunft fortgeschrieben werden muss.

### **3.3 Identifizierte Akteurstypen im deutschen Wasserstoffmarkt**

#### **3.3.1 Übersicht über Akteurstypen**

Auf Basis der Literatur und der qualitativen Interviews wurden Akteurstypen definiert, die nach der standardisierten Befragung und den Workshops teilweise noch einmal zusammengefasst

wurden. Im Ergebnis erscheint für die agentenbasierte Modellierung des deutschen H<sub>2</sub>-Marktes eine Unterteilung in die sechs in Tabelle 1 aufgeführten Typen zweckmäßig.

*Tabelle 1: Identifizierte Akteurstypen im deutschen Wasserstoffmarkt – ausgewählte Charakteristika*

Bezeichnung	Investitionslogik	Amortisation	Rendite	Umgang mit Unsicherheit
Industriegasehersteller	Commodity	5-10 Jahre	Hoch	Langfristiger Horizont, langfristige Verträge
Projektentwickler	Neues Geschäftsfeld, Rendite	5-10 Jahre	Mittel	Langfristiger Horizont, unterschiedlicher Umgang
Große Energieversorger	Neues Geschäftsfeld, Portfolio optimieren	10-15 Jahre	Mittel-hoch	Langfristiger Horizont, langfristige Verträge, teilweise eigene Anlagen
Kleine und mittlere Energieversorger	Neues Geschäftsfeld, Portfolio optimieren	10-15 Jahre	Niedrig	Risikoavers, kleine Projekte, Joint Ventures
H <sub>2</sub> -Eigenerzeuger	Make or Buy, abhängig von Kernnetzzugang	10-15 Jahre	Hoch	Kürzerer Horizont (außer: familiengeführt), Eigenversorgung, teilweise Aufschläge
Sonstige	Divers, teilweise v.a. Lernen	5-10 Jahre	Niedrig	(divers)

Quelle: Eigene quantitative und qualitative Datenerhebung

Abgesehen von der Restekategorie unterscheiden sich die fünf Akteurstypen im Wesentlichen nach Investitionslogik und Größe. Letztere hat unmittelbare Auswirkungen auf die Risikotragfähigkeit und damit auch auf den Umgang mit Unsicherheiten.

### 3.3.2 Investitionslogiken

Bei den Investitionslogiken zeigt sich, dass Industriegasehersteller am ehesten dem im ABM abgebildeten Fall einer isolierten Investitionsentscheidung für Wasserstoffprojekte entsprechen. Sie bieten standardisierte Rohstoffe bzw. Waren (Commodities) an, ggf. differenziert nach weiteren Eigenschaften wie der „Wasserstofffarbe“.

Projektentwickler im Wasserstoffmarkt verfolgen primär das Ziel, neue Geschäftsfelder zu erschließen. Mit der weiteren Marktentwicklung rückt zunehmend die Renditeorientierung in den Vordergrund. Es ist insofern davon auszugehen, dass in den ersten Jahren auch dann in Wasserstoffprojekte investiert wird, wenn das Investitionskriterium nicht (ganz) erfüllt ist. Der genaue Zeitpunkt des „Wechsels“ hin zu stärkerer Renditeorientierung lässt sich aber nicht exakt bestimmen und damit schwerlich im ABM abbilden.

Geschäftsfeldentwicklung wird in den Interviews und der standardisierten Befragung von Energieversorgern ebenfalls als ein Hauptmotiv genannt. Hinzu tritt die Optimierung des Gesamtportfolios – welches im ABM allerdings nicht abgebildet wird, weil die weiteren Assets jenseits der Systemgrenze liegen. Eine potenzielle Nachnutzung vorhandener Gasnetze spielt eine zentrale Rolle, unabhängig von der Größe der Energieversorgungsunternehmen. Wasserstoffeigenerzeuger sind definitionsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass sie sich im Rahmen der „Make-or-Buy“-Überlegungen [17], [18] wenigstens partiell für „make“ entscheiden. In der Praxis zeigt sich häufig ein hybrides Modell, das als „Make-and-Buy“-Strategie beschrieben wird [19], wobei die Entscheidung oftmals auch vom Zugang zum Wasserstoffkernnetz abhängig ist, wie Interviews und Workshopdiskussionen zeigen. Diese Akteure verfolgen eine produktorientierte Strategie, bei der insbesondere der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der hergestellten Produkte reduziert werden soll, um ökologische Zielvorgaben und Marktanforderungen zu erfüllen. Die Restekategorie („Sonstige“) ist naturgemäß divers mit Blick auf die Motivationen. In frühen Marktphasen scheint hier insbesondere die Erschließung neuer Geschäftsfelder und damit verbundenes Lernen im Mittelpunkt zu stehen.

### 3.3.3 Renditeerwartungen

Die Investitionsrechnung kennt unterschiedliche Verfahren, um die Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition zu beurteilen, u. a. die Amortisationsdauer, den internen Zinsfuß und den Kapitalwert [20]. Daher wurden bei den Befragungen unterschiedliche Kennwerte er- bzw. abgefragt. Angaben zu gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (Weighted Average Costs of Capital, WACC) einzelner Unternehmen können auch üblichen Börsenportalen entnommen werden. Sowohl bei den qualitativen Interviews als auch der standardisierten Befragung war eine große Zurückhaltung bei den Interviewpartnern zu verzeichnen, was Antworten zur Frage nach erwarteten Renditen bzw. WACC angeht. Auch in der Literatur finden sich relativ wenige Informationen hierzu: Moongyung und Deger geben die Spanne des WACC mit 6,4 % bis 24,1 % an, wobei die Stichprobe lediglich acht, teilweise global agierende Unternehmen umfasst [21]. In anderen Studien werden die WACC mit 8 % angegeben.

Industriegasehersteller geben in den Befragungen an, dass international anerkannte Renditeanforderungen, wie sie in vergleichbaren Geschäftsfeldern Anwendung finden, auch im Wasserstoffmarkt gelten. Da es sich um Infrastrukturen handelt, sind die Amortisationsdauern etwas länger als üblicherweise in der Industrie. Die Zielrendite wird mit 10-15 % angegeben. Für einzelne Unternehmen konnten WACC von 6-9 % identifiziert werden. Die Projektentwickler bewegen sich in einem ähnlichen Rahmen, wobei die Angaben in der Umfrage – bei insgesamt kleiner Gesamtzahl – stark schwanken, also mit großer Unsicherheit verbunden sind. Ähnliches ist für die Eigenerzeuger zu vermuten, die sich laut Umfrage in einem ähnlichen Wertebereich bewegen. Bei den Energieversorgern liegen die Amortisationsdauern etwas über denen der drei zuvor genannten Akteurstypen. Die großen Versorger unterscheiden sich von den kleineren v. a. hinsichtlich der Höhe der Renditeanforderungen. RWE gibt in seinem Jahresbericht eine Zielrendite (interner Zinsfuß) von 8-12 % für Wasserstoffprojekte an. Bei den kleinen Energieversorgern liegt die Zielrendite laut Umfrage im Einzelfall sogar unter 5 %.

### 3.3.4 Umgang mit Unsicherheiten

Unsicherheiten bestehen bei Elektrolyseprojekten insbesondere mit Blick auf die mengenmäßige und die Preisentwicklung für Strom als Input sowie für Wasserstoff als finales Produkt. Langfristige Verträge sind ein übliches Instrument bei hohen Anfangsinvestitionskosten, um solchen Unsicherheiten zu begegnen. Aus diesem Grund werden sie in den Befragungen vielfach und von allen Akteursgruppen genannt.

Energieversorger können bezüglich des Inputs vielfach auf eigene Anlagen zurückgreifen – eine der Möglichkeiten, im gesamten Unternehmensportfolio zu optimieren. Die Unsicherheiten bzgl. des Strompreises dürften somit bei diesen beiden Akteurstypen geringer ausfallen. Bei kleinen und mittleren Energieversorgern greift darüber hinaus eine Restriktion bzgl. der Größe einzelner Investments: Sie setzen aus Gründen der Finanzkraft und Risikostreuung häufig eher kleinere Projekte um, bevorzugt in Joint Ventures. (Pauschale) Preisabschläge beim Wasserstoffpreis sind eine in der betriebswirtschaftlichen Literatur zwar nicht empfohlene [20], aber offenbar gängige Praxis, insbesondere in dieser Akteursgruppe. Gleiches gilt für kalkulatorische Zinsaufschläge zur Abbildung des Risikos. Über die Höhe der Ab- und Aufschläge ist jedoch nichts bekannt, sodass eine Abbildung im ABM unterbleiben muss.

### 3.4 Zwischenfazit

Die hier auszugsweise skizzierten Eigenschaften der einzelnen Akteurstypen lassen sich somit in Teilen nur schwer im ABM abbilden. Gründe sind fehlende Datenverfügbarkeit und Unsicherheiten bei der Quantifizierung aufgrund geringer Rückläufe, die sich möglicherweise durch weitergehende Forschungsarbeiten beheben lassen. Zu beachten sind aber auch Systemgrenzen der Modelle und praktische (Kapazitäts-)Grenzen bei der Modellierung.

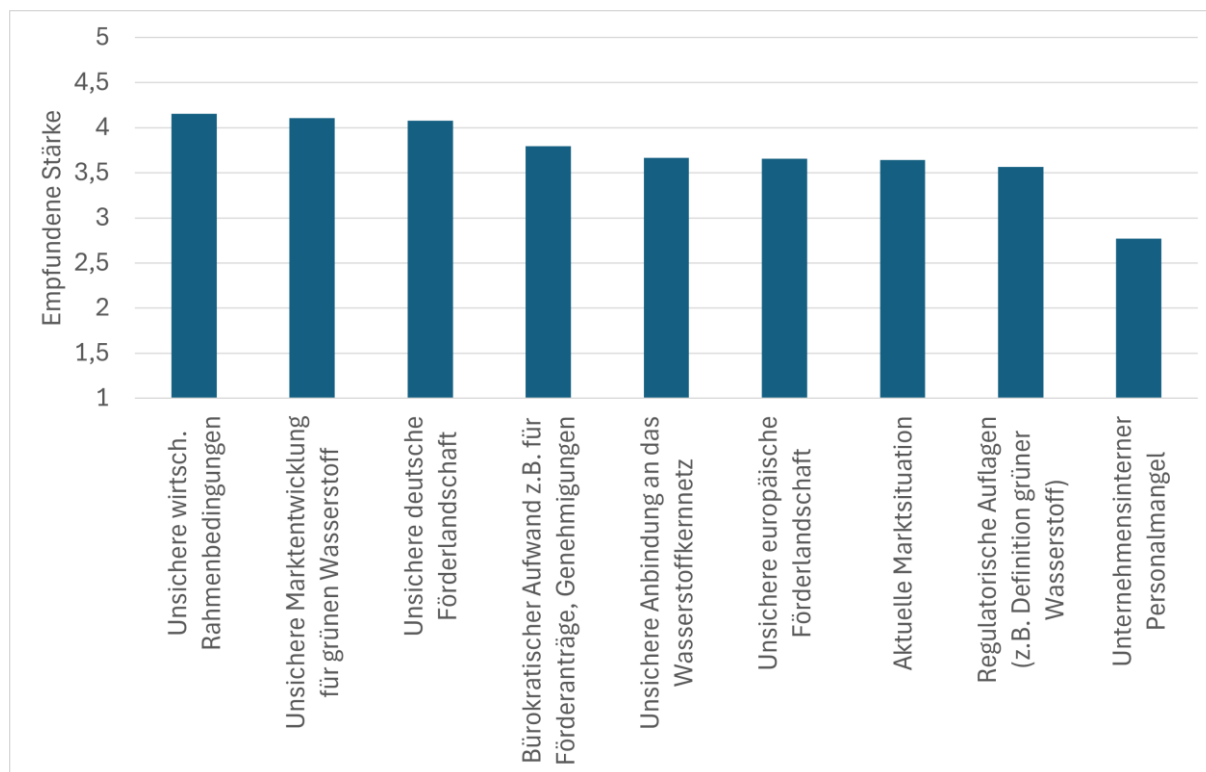


Abbildung 2: Bewertung von Investitionshemmnissen (Skala: 1 = irrelevant/schwach bis 5 = höchst relevant/stark) (n=39)

## 4 Rahmenbedingungen

### 4.1 Bewertung der Bedeutung unterschiedlicher Rahmenbedingungen

Das Investitionsverhalten der Akteure ist entscheidend von der jeweiligen Marktphase und der sie bestimmenden Merkmale geprägt. Entsprechend spielt die Charakterisierung der aktuellen Marktphase sowie die Antizipation möglicher Übertritte in künftige Marktphasen auch für die Simulation des Investitionsverhaltens in H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen im agentenbasierten Modell AMIRIS eine Rolle. Die Bedeutung von wirtschaftspolitischen und strukturellen Rahmenbedingungen für den Wasserstoffmarkthochlauf zeigt sich auch in den Ergebnissen der quantitativen Datenerhebung (n = 39). Die befragten Wasserstoffmarktakteure wurden gebeten, verschiedene Rahmenbedingungen, die als Investitionshemmnisse wirken könnten, auf einer fünfstufigen Likert-Skala nach Schwere zu bewerten. Die Bewertungen der Befragten sind in Abbildung 2 dargestellt. Demnach werden unsichere wirtschaftliche Rahmenbedingungen, unsichere Marktentwicklungen für grünen Wasserstoff und eine unsichere Förderlandschaft als die drei Faktoren mit der am stärksten hemmenden Wirkung für den Hochlauf des deutschen Wasserstoffmarkts angesehen.

Diese Einschätzung deckt sich mit den Ergebnissen einer Online-Befragung (n = 311) des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI) aus dem Jahr 2024 [22]. Hier gaben die befragten Wasserstoffmarktakteure an, die deutsche Förderkulisse für Wasserstoff eher negativ wahrzunehmen. Diese negative Einschätzung trifft ebenso auf den rechtlichen Rahmen für Wasserstoff zu. Insbesondere werden inkohärente Regulierungen auf EU-Ebene und bestehende regulatorische Lücken als hinderlich angesehen. Diese regulatorischen Hemmnisse treten demnach entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf.

## 4.2 Marktphasen

Aus der Literatur [23] ergeben sich bei einem für Technologieentwicklungen typischen S-förmigen Verlauf [24] vier idealtypische Marktphasen (Abbildung 3) für den Wasserstoffsektor. Als Zielbild am Ende der Entwicklung steht ein sich selbst tragender Markt für grünen Wasserstoff, der eine klimaneutrale, sichere, kosteneffiziente und von staatlichen Eingriffen weitgehend unabhängige Versorgung bereitstellt [25]. Die tatsächlichen Phasen der Marktentwicklung lassen sich nicht trennscharf abgrenzen; die Übergänge sind fließend. Soweit Marktphasen nicht modellendogen bestimmt werden, ergibt sich für das ABM die Schwierigkeit, dass bei nach Marktphasen variierenden Parameterwerten die Grenzzahre festgelegt werden müssen. In den Interviews wird hier zumeist auf regulatorische Rahmensetzungen (z. B. ETS) Bezug genommen. Eine modellendogene Bestimmung wäre denkbar, aber mit hohem Modellierungsaufwand verbunden. Genaue Werte für Parametervariationen lassen sich zudem nur schwer auf empirischer Basis quantifizieren.

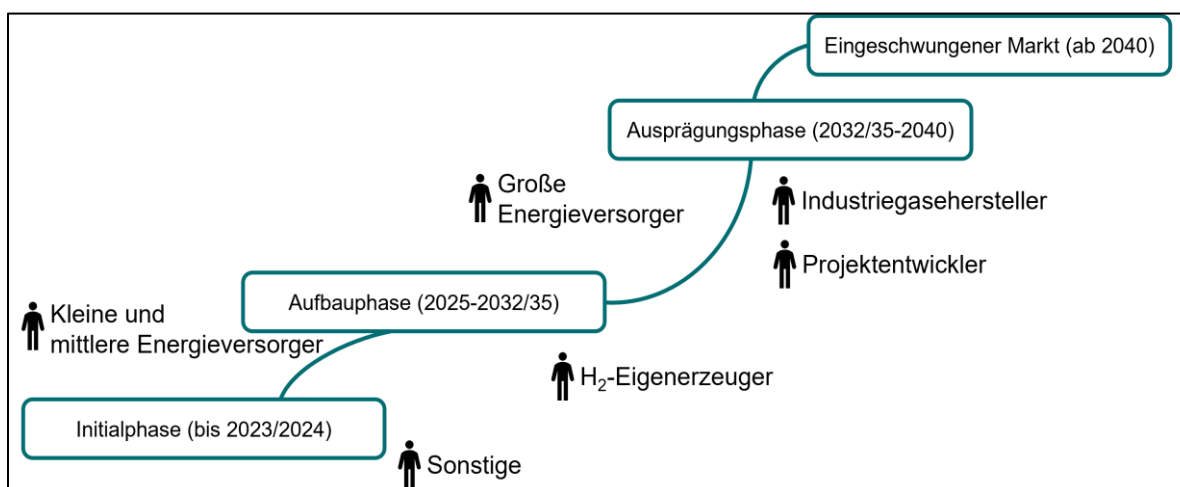


Abbildung 3: Marktphasen Wasserstoff und Einordnung der Akteure  
Quelle: Eigene Darstellung nach: [23], [25]

## 4.3 Wirkungsweise der Rahmenbedingungen

Anhand der empirisch erhobenen quantitativen und qualitativen Daten wird die Auswirkung verschiedener Rahmenbedingungen auf die Investitionsentscheidung für H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen für unterschiedliche Akteursgruppen und Marktphasen analysiert:

Tabelle 2: Wirkungsweise der identifizierten Rahmenbedingungen in den Marktphasen

Rahmenbedingung	Initialphase (bis 2023/24 erwartet, tatsächlich noch andauernd)	Aufbauphase (2025 [bzw. später: 2027?] bis 2032/ 2035 [evtl. länger?])	Ausprägungsphase (2032/35-2040 [evtl. länger: 2045?])	Eingeschwungener Markt (ab 2040/45?)
<b>Förderinstrumente</b>	Essenziell für Pilotprojekte und Technologieeinführung (NPV↑)	Weiterhin wichtig für Investitionssicherheit bei Skalierung	Markt beginnt sich selbst zu tragen, Förderung wirkt ergänzend, Förderbedarf sinkt mit Auslaufen von ETS 1	Markt stabil, Förderung nicht mehr notwendig
<b>Definition grüner H<sub>2</sub></b>	Basis für Investitionsentscheidungen (Förderkriterium), ggf. höhere Kosten		Produktdifferenzierung?	
<b>Planungs-/ Genehmigungsverfahren</b>	Unsicherheiten dort, wo wenig bekannt ⇒ Projektverzögerungen	Verzögerungen hemmen Skalierung und Markteintritte (regional)	Abhängig von Typ/ Größe, weniger Unsicherheiten & Verzögerungen	Verfahren bekannt
<b>Infrastruktur / Kernnetz</b>	Im Aufbau ⇒ Ankerkunden? „Make“ statt „Buy“	Ausbau ⇒ weniger Eigenversorgung	Skalierung hängt davon ab	Stabile Versorgung
<b>Politische Unsicherheiten</b>	Klarheit fehlt ⇒ WACC↑, geringere Zahl Akteure			Ggf. Zyklen (vgl. EE-Ausbau)
<b>CO<sub>2</sub>-Preis</b>	noch geringe Wirkung auf Investitionsentscheidung	beginnt Investitionsentscheidungen zu beeinflussen	Entscheidend für Wettbewerbsfähigkeit	
<b>Nachfrageunsicherheit</b>	Hinauszögern von Investitionsentscheidungen	Abhängig von politischen Signalen (s.o.); Absicherung oder kein Invest	Zunehmende Sicherheit, kurzfristigere Kontrakte	Nachfrage etabliert und stabil
<b>Fachkräftesituation</b>	Personalbedarf allgemein noch gering, ggf. problematisch für kleine Akteure	beginnt relevant zu werden	Engpässe wirken auf Ausbau	

EE: Erneuerbare Energien, ETS: Emission Trading System, NPV: Net Present Value, WACC: Weighted Average Cost of Capital

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf qualitativer und quantitativer Erhebung

(1) Förderinstrumente, (2) Definition grünen Wasserstoffs (z. B. monatliche vs. stündliche Äquivalenz), (3) Planungs- und Genehmigungsverfahren, (4) Auf-/Ausbau des Wasserstoffkernnetzes bzw. Anbindung an dieses (Infrastruktur), (5) politische Unsicherheiten auf unterschiedlichen Ebenen, (6) CO<sub>2</sub>-Preisentwicklung, (7) Unsicherheit der Nachfrageentwicklung, (8) Fachkräftesituation und (9) makroökonomisches Umfeld. In Tabelle 2 werden die Wirkungsweisen der genannten Rahmenbedingungen innerhalb der einzelnen Marktphasen basierend auf den qualitativen und quantitativen Daten dargestellt.

Förderung wird von fast allen Interviewpartnern als notwendig in den beiden ersten Marktphasen eingestuft. Daher werden unterschiedliche Förderinstrumente im ABM abgebildet. Gleiches gilt für unterschiedliche Definitionen grünen Wasserstoffs, an die Förderungen im Regelfall gebunden sind.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Förderung wirken sich auch politische Unsicherheiten stark auf die Marktentwicklung aus. In den Interviews wird hier insbesondere auf Unsicherheiten infolge des Urteils des Bundesverfassungsgerichts zum Klima- und Transformationsfonds verwiesen. Der Zinssatz müsste demnach in früheren Marktphasen tendenziell höher angesetzt werden; wie hoch genau, lässt sich aber kaum verlässlich empirisch bestimmen. Die mit Planungs- und Genehmigungsverfahren verbundenen Unsicherheiten variieren gemäß Interviews stark regional. Ähnlich wie die Anbindung an das Kernnetz wäre für eine Berücksichtigung solcher Unsicherheiten folglich ein regional aufgelöstes Modell notwendig.

Punkt 7 wird annahmegemäß ausgeklammert, da die Nachfrage in AMIRIS eine exogene Größe ist. Fachkräftesituation und makroökonomisches Umfeld werden in den Interviews kaum bzw. gar nicht angesprochen. Die Experten in den Workshops führen dies darauf zurück, dass beide Rahmenbedingungen erst in späteren Marktphasen zum Tragen kämen.

## 5 Fazit

Die im Forschungsprojekt NoRaLock-H<sub>2</sub> identifizierten Akteurstypen sind durch unterschiedliche Investitionslogiken, Renditeanforderungen und Umgangsweisen mit Unsicherheiten gekennzeichnet. Diese Eigenschaften ließen sich qualifizieren und, wenn auch teilweise mit Unsicherheiten aufgrund der geringen Rückläufe auf die durchgeführte Umfrage, partiell quantifizieren. Um alle für die Investitionsentscheidungen relevanten Zusammenhänge im ABM abzubilden, müssten weitere Investitionslogiken, insbesondere Portfolioentscheidungen der Energieversorger, implementiert werden, was den Datenbedarf und Modellierungsaufwand erheblich steigern würde. Gleiches gilt für die Differenzierung nach Marktphasen. Die Wirkung einzelner Rahmenbedingungen lässt sich qualitativ recht gut einzelnen Marktphasen zuordnen. Eine zeitlich präzise Zuordnung und Quantifizierung der Wirkungen erweist sich für viele relevante Rahmenbedingungen allerdings als schwierig, sieht man von den Förderinstrumenten und der Frage der Definition grünen Wasserstoffs (zeitliche Äquivalenz) ab.

## Referenzen

- [1] B. Lux u. a., „The role of hydrogen in a greenhouse gas-neutral energy supply system in Germany“, *Energy Conversion and Management*, Bd. 270, S. 116188, Okt. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116188.
- [2] T. Schöb, F. Kullmann, J. Linßen, und D. Stolten, „The role of hydrogen for a greenhouse gas-neutral Germany by 2045“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 48, Nr. 99, S. 39124–39137, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.007.
- [3] M. Riemer, L. Zheng, J. Eckstein, M. Wietschel, N. Pieton, und R. Kunze, „Future hydrogen demand: A cross-sectoral, global meta-analysis“. Fraunhofer ISI Karlsruhe, 2022. Zugegriffen: 31. Januar 2026. [Online]. Verfügbar unter: [https://isi-cmsportal.de/hypat-wAssets/docs/new/publications/HYPAT\\_Working\\_Paper\\_04\\_2022\\_Future\\_hydrogen\\_demand.pdf](https://isi-cmsportal.de/hypat-wAssets/docs/new/publications/HYPAT_Working_Paper_04_2022_Future_hydrogen_demand.pdf)
- [4] M. Greaker und T.-R. Heggedal, „Lock-In and the Transition to Hydrogen Cars: Should Governments Intervene?“, *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*, Bd. 10, Nr. 1, S. Art. 40, 2010, doi: 10.2202/1935-1682.2406.
- [5] A. Klitkou, S. Bolwig, T. Hansen, und N. Wessberg, „The role of lock-in mechanisms in transition processes: The case of energy for road transport“, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Bd. 16, S. 22–37, Sep. 2015.
- [6] M. C. Simoens, L. Fuenfschilling, und S. Leipold, „Discursive dynamics and lock-ins in socio-technical systems: an overview and a way forward“, *Sustain Sci*, Bd. 17, Nr. 5, S. 1841–1853, Sep. 2022, doi: 10.1007/s11625-022-01110-5.
- [7] J. Schoonenboom und R. B. Johnson, „How to Construct a Mixed Methods Research Design“, *Köln Z Soziol*, Bd. 69, Nr. S2, S. 107–131, Okt. 2017, doi: 10.1007/s11577-017-0454-1.
- [8] K. P. Andreasen und B. K. Sovacool, „Mapping and interpreting critical hydrogen stakeholders in Denmark“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 39, Nr. 15, S. 7634–7637, Mai 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.091.
- [9] E. Karakaya, C. Nuur, und L. Assbring, „Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future?“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 195, S. 651–663, Sep. 2018.
- [10] A. Belova, C. Quittkat, L. Lehotský, M. Knodt, J. Osička, und J. Kemmerzell, „The more the merrier? Actors and ideas in the evolution of German hydrogen policy discourse“, *Energy Research & Social Science*, Bd. 97, S. 102965, März 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.102965.
- [11] DENA, „Wasserstoffprojekte in Deutschland: Die verschiedenen Stufen der Wertschöpfungsketten“, Deutsche Energieagentur (DENA), Nov. 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/221129\\_dena\\_GR\\_Wasserstoffprojekte\\_Deutschland\\_EW\\_9.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/221129_dena_GR_Wasserstoffprojekte_Deutschland_EW_9.pdf)
- [12] M. Aring, M. Breul, und J. Revilla Diez, „Energietransition im Rheinischen Revier – Implikationen der Projektförderung für eine grüne Pfadentwicklung“, *RuR*, Bd. 80, Nr. 5, S. 588–600, Okt. 2022, doi: 10.14512/rur.174.
- [13] D. Schlund, S. Schulte, und T. Sprenger, „The who’s who of a hydrogen market ramp-up: A stakeholder analysis for Germany“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 154, S. 111810, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111810.
- [14] K. Weiler u. a., „Entwicklung und Umsetzung eines Monitoringsystems zur Analyse der Akteursstruktur bei Freiflächen-Photovoltaik und der Windenergie an Land: Methodik zur Erhebung der Akteursstruktur; Teilbericht“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 16, 2021. Zugegriffen: 20. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-16\\_cc\\_16-2021\\_methodikbericht\\_uba-akteursvielfalt.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-16_cc_16-2021_methodikbericht_uba-akteursvielfalt.pdf)
- [15] C. M. Macal, „Everything you need to know about agent-based modelling and simulation“, *Journal of Simulation*, Bd. 10, Nr. 2, S. 144–156, Mai 2016, doi: 10.1057/jos.2016.7.
- [16] L. Willeke, J. Kochems, und K. Nienhaus, „Agent-Based Modelling of Investment Decisions in the Electricity Sector“, in *2025 21st International Conference on the European*

- Energy Market (EEM)*, Lisbon, Portugal: IEEE, Mai 2025, S. 1–7. doi: 10.1109/EEM64765.2025.11050320.
- [17] P. G. Klein, „The Make-or-Buy Decision: Lessons from Empirical Studies“, in *Handbook of New Institutional Economics*, C. Menard und M. M. Shirley, Hrsg., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 435–464. doi: 10.1007/0-387-25092-1\_18.
- [18] R. Medina Serrano, M. R. González Ramírez, und J. L. Gascó Gascó, „Should we make or buy? An update and review“, *European Research on Management and Business Economics*, Bd. 24, Nr. 3, S. 137–148, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.iedeen.2018.05.004.
- [19] A. Parmigiani, „Why do firms both make and buy? An investigation of concurrent sourcing“, *Strategic Management Journal*, Bd. 28, Nr. 3, S. 285–311, März 2007, doi: 10.1002/smj.580.
- [20] L. Kruschwitz, *Investitionsrechnung*, 15. Aufl. in De Gruyter Studium Series. Berlin/München/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2019.
- [21] L. Moongyung und S. Deger, „Financing cost impacts on cost competitiveness of green hydrogen in emerging and developing economies“, *OECD Environment Working Papers* 227, Nov. 2023. doi: 10.1787/15b16fc3-en.
- [22] EWI, „H2-Marktindex 2024 - Ergebnisse einer Befragung von Marktakteuren“, *Energie-wirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH*, 2024. Zugegriffen: 6. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2024/09/20240905\\_EWI\\_H2-Marktindex\\_2024\\_Gutachten\\_final.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2024/09/20240905_EWI_H2-Marktindex_2024_Gutachten_final.pdf)
- [23] BDEW, „Diskussionspapier für ein Marktdesign für Wasserstoff“, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2023. Zugegriffen: 17. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bdew.de/media/documents/2023-07-04\\_BDEW-Diskussionspapier\\_Marktdesign\\_Wasserstoff\\_final\\_online\\_v2.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/2023-07-04_BDEW-Diskussionspapier_Marktdesign_Wasserstoff_final_online_v2.pdf)
- [24] E. M. Rogers, *Diffusion of innovations*, Fifth edition. New York London Toronto Sydney: Free Press, 2003.
- [25] K. Westphal, M. Kübler, L. Möhring, und J. Völler, „Wasserstoff und Markthochlauf - Marktphasen und Zielmodelle“, H2Global Stiftung, Hamburg, Policy Brief 04/2023, 2023. Zugegriffen: 5. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://files.h2-global.de/H2Global-Stiftung-Policy-Brief-04\\_2023-DE.pdf](https://files.h2-global.de/H2Global-Stiftung-Policy-Brief-04_2023-DE.pdf)
- [26] M. Albuscheit u. a., „Im Dickicht der Wasserstoffförderung: Wie komplexe Instrumente den Markthochlauf prägen“. Technische Universität Nürnberg, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ssrn.com/abstract=5213624>