

SYSTEMATISCHES VORGEHEN ZUR ANALYSE EINES „TECHNOLOGISCHEN INNOVATIONSSYSTEMS (TIS)“ IM FELD WASSERSTOFF AM BEISPIEL DER SÜDAFRIKANISCH-DEUTSCHEN ENERGIEPARTNERSCHAFT

Lukas Kasper* (Autor), Eva Hauser (Co-Autorin)

Beide Autor*innen: IZES gGmbH, Altenkesseler Straße 17, D-66115 Saarbrücken,
kasper@izes.de / LukasKasper96@gmx.de & hauser@izes.de, +49 681 844 972-0;
<https://www.izes.de>

Kurzfassung:

Im Zuge der globalen Energiewenden spielt Wasserstoff (H₂) als flexibel einsetzbarer Energieträger eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung. Voraussetzung dafür ist, dass das Substitutionsgut für fossile Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wird. Deutschland kann auf Grund zu geringer erneuerbarer Kapazitäten grünen Wasserstoff nicht in ausreichenden Mengen produzieren und ist auf Importe aus dem Ausland angewiesen, wozu auch Länder des globalen Südens gehören. [1] Südafrika zum Beispiel verfügt über optimale Bedingungen zur grünen Stromproduktion und stellt sich als geeigneter Standort für Wasserstoffproduktionskerne dar. Durch die bestehende Energiepartnerschaft zwischen Deutschland und Südafrika soll die Wasserstoffwirtschaft und damit das H₂-Upscaling im Rahmen des vorliegenden Wasserstoff-Innovationssystems gezielt gefördert werden.

Mit Hilfe sogenannter „Technologischer Innovationssysteme (TIS)“ können solch spezifische Systeme analysiert, bewertet und ihre Entwicklung mit konkreten Ansätzen unterstützt werden. Allen voran im Technologiefeld Wasserstoff mit Fokus auf grünen Wasserstoff stecken die Strukturen noch in der Genese, sodass ein systematisches Vorgehen zum Verstehen sowie Fördern der Technologie das große Ziel der Treibhausgasneutralität unterstützt.

Die hier vorgestellte TIS-Analyse¹ zeigt, dass Südafrika grundsätzlich über gute Voraussetzungen für die Entwicklung von Wasserstoffproduktionskernen verfügt. Gegenwärtig befindet sich die Technologie im Übergang von der Entwicklungsphase hin zur Einführung in den Markt. Folglich konnten im Rahmen der TIS-Analyse sechs übergreifende Hemmnisse identifiziert werden, denen mit entsprechenden Empfehlungen im Rahmen der Energiepartnerschaft begegnet werden soll. Die Ergebnisse zeigen zusammenfassend zudem die Potenziale Südafrikas, zukünftig als entscheidender Akteur auf dem H₂-Markt aufzutreten und gleichzeitig, wie wichtig bilaterale Kooperationen in einer schnelllebigen und von Krisen geprägten Welt sind.

¹ Dieser Artikel basiert auf der Masterarbeit des Autors mit dem Titel „Aufbau einer gelingenden binationalen auf Wasserstoff basierenden Energiepartnerschaft zwischen Deutschland und Südafrika“, an der Fachhochschule Erfurt, erstellt im Rahmen des Projekts Global-H₂-Upscaling, einsehbar unter: <https://doi.org/10.22032/dbt.59228>

Die Arbeit und die daraus gewonnen Erkenntnisse sind Teil des Forschungsprojektes „Global-H₂-Upscaling“, welches notwendige Maßnahmen für ein Upscaling ausländischer EE-basierter H₂-Produktionskerne untersucht. Das IZES wird von Seiten des deutschen Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, KKZ 03EI1046) hierfür gefördert und setzt es zusammen mit der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) bis Ende 2024 um.

Keywords: Wasserstoff, Technologisches Innovationssystem, Energiepartnerschaft

1 Einführung in „Technologische Innovationssysteme (TIS)“

Grundlage zum Verständnis von TIS stellt das Paper „On the nature, function and composition of technological systems“ von B. Carlsson und R. Stankiewicz (1991) dar. Die Autoren zeigen in ihrer Arbeit, dass das wirtschaftliche Wachstum eines Landes gleichzeitig das Entwicklungspotenzial als Funktion der TIS, an denen diverse Wirtschaftsakteure (Agenten) beteiligt sind, widerspiegelt. TIS zeichnen sich nach ihrer Einschätzung durch die Fähigkeit, neue Geschäftsmöglichkeiten zu entwickeln und zu nutzen, die Bündelung von Ressourcen sowie eine ausgeprägte institutionelle Infrastruktur aus. Die angeführte Definition hebt dabei die Bedeutung von Technologien sowie ihrer Erzeugung, Verbreitung und Nutzung hervor:

„A technological system is defined as a dynamic network of agents interacting in a specific economic/industrial area under a particular institutional infrastructure and involved in the generation, diffusion, and utilization of technology.“ [2]

In der Betrachtung der Autoren fällt der Blick einerseits auf die Quellen des wirtschaftlichen Wandels in Form von Vielfalt, Innovation und Diffusion und andererseits auf organisatorische und institutionelle Faktoren, wie ökonomische Kompetenz oder institutionelle Infrastrukturen. So lässt sich in dem Kontext zudem festhalten, dass TIS nicht aus Güter- und Dienstleistungsströmen, sondern aus Wissens- und Kompetenznetzen bestehen, die sich in einem Umfeld aus Agenten und vorhandenen Ressourcen (Menschen, Ideen, physische Güter) zu Clustern respektive „Entwicklungsblöcken“ wandeln können. Diese dienen damit dem Zweck einer übergreifenden Anwendung einer spezifischen Technologie. [2]

Im Jahr 2008 veröffentlichten A. Bergek, S. Jacobsson, B. Carlsson, S. Lindmark und A. Rickne das wissenschaftliche Paper „Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis“. Die Autor*innen führen damit die Ansätze zur Analyse von TIS sowie Innovationsdynamiken weiter. Ihre Arbeit basiert auf Literatur sowie (eigenen) Forschungserkenntnissen und mündet in einem praktischen Analyseschema für Entscheidungsträger zur Identifikation von Schlüsselfragen und Erstellung konkreter Ziele in der Politik. Im Rahmen der Erstellung des Analyseschemas gehen die Autor*innen unter anderem auch auf die strukturellen Gegebenheiten und Dimension eines TIS ein. Strukturell enthalten TIS nicht nur Komponenten, die ausschließlich auf die Technologie ausgerichtet sind, sondern all diejenigen Elemente, die den Innovationsprozess der Technologie beeinflussen. Hinsichtlich der definierten, geografischen Dimension wird dieser oftmals ein globaler Charakter zugeschrieben. Die Autor*innen betonen dabei die Bedeutung des globalen Kontextes innerhalb der Analyse. So kann nach Einschätzung von Bergek et al. ein räumlich begrenztes TIS ohne Betrachtung seiner globalen Einbettung weder verstanden, noch bewertet werden.

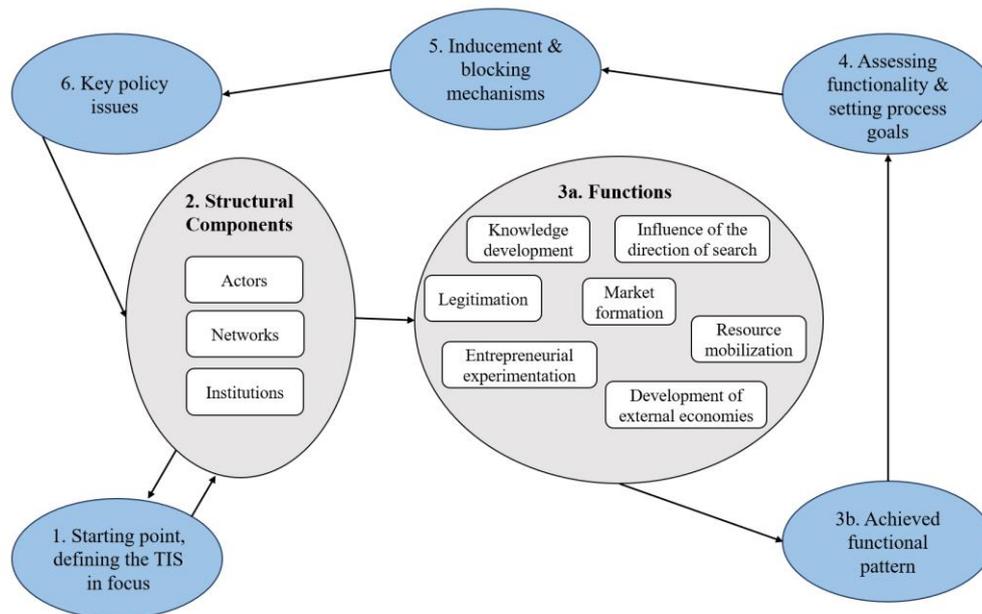


Abbildung 1: Analyseschema für TIS und ihre Dynamiken (Darstellung in Anlehnung an: Bergek et al. (2008): *Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems*, S. 411 auf Basis von Oltander and Perez Vico (2005): *A survey of the Swedish security industry and an innovation system analysis*)

Das erarbeitete Schema beschreibt grundsätzlich sechs verschiedene Subanalysen, die dabei helfen, nicht nur strukturelle Merkmale und Dynamiken eines TIS zu verstehen, sondern auch sieben verschiedene Kernprozesse, sogenannte „Funktionen“, zu bewerten. Die Funktionen haben dabei erheblichen Einfluss auf die Entwicklung, Verbreitung und Nutzung einer Technologie und damit gleichermaßen auf die Effektivität eines technischen Innovationssystems. Die Funktionen werden somit als Beitrag einer oder mehrerer Komponenten zur Gesamtleistung eines Innovationssystems definiert [3].

Aufbauend auf den Arbeiten von Bergek et al. (2008) entwickelten M.P. Hekkert, S.O. Negro, G. Heimeriks und R. Harmsen ebenfalls Ansätze zur Analyse von TIS und ihren Dynamiken mit Fokus auf elementare Prozessfunktionen. Im Ergebnis veröffentlichten sie im Jahr 2011 die Kurzstudie „Technological Innovation System Analysis – A manual for analysts“. Das Handbuch dient als Nachschlagewerk mit Anleitungen und Erläuterungen für die Analyse von TIS zu politischen Entscheidungsprozessen. So definieren Hekkert et al. im Grundsatz die gleichen sieben Hauptfunktionen in einem TIS wie Bergek et al. (2008) und legen darüber hinaus fünf Phasen zur Bewertung eines Innovationssystems vor.

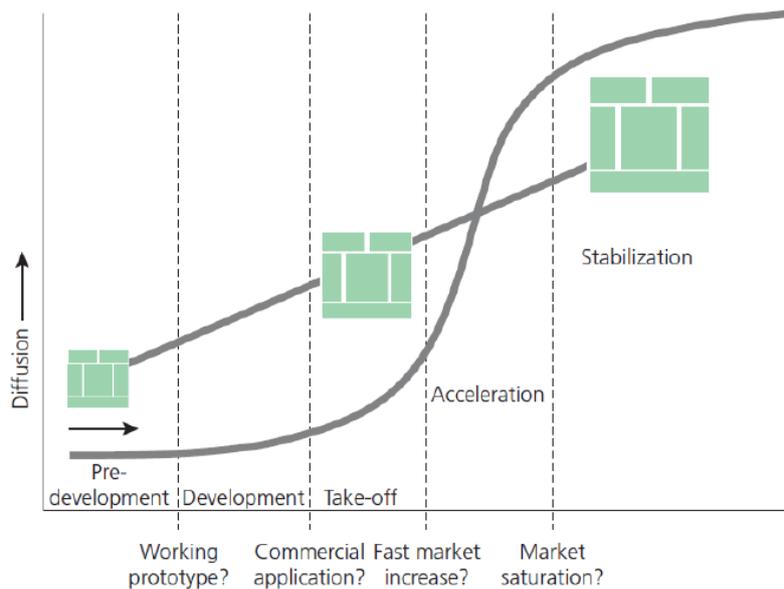


Abbildung 2: Verschiedene Entwicklungsphasen einer Innovation (Quelle: Hekkert et al. (2011): *Technological Innovation System Analysis*, S. 9)

In den ersten Schritten werden die Strukturen, Entwicklungsphasen und Funktionsweisen im TIS beschrieben. Daran anschließend werden in Phase 4 die wichtigsten Systemhindernisse definiert und in Phase 5 Schlussfolgerungen für eine optimierte Politikgestaltung gezogen. Hinsichtlich der Systemfunktionen gilt es festzuhalten, dass diese gegenüber der reinen Struktur mehr Aussagekraft besitzen und zeigen, wie die Prozesse in einem Innovationssystem tatsächlich ablaufen. Die Effektivität eines TIS kann dabei ausschließlich durch Experten und/oder wichtige Stakeholder, die selbst Teil des Innovationssystems sind, bewertet werden. [4]

2 Analyseinheit und Systemgrenze

Die Definition und Eingrenzung des im Fokus stehenden TIS können in der Regel eine Herausforderung darstellen, sind für diese Fallstudie im Rahmen des übergeordneten Forschungsinteresses aber in ihren Grundzügen bereits vorgegeben. So fällt der Fokus einerseits auf das Produkt Wasserstoff, mit gleichzeitiger Vertiefung auf die Produktion von grünem H₂ und andererseits auf das Hoheitsgebiet Südafrikas als räumliche Systemgrenze. Gleichwohl bleibt der globale Charakter des TIS bestehen, sodass externe Einflüsse, wie internationale Abkommen, Kooperationen und Marktbildung, weiterhin auf das Technologiefeld „Wasserstoff“ innerhalb Südafrikas einwirken können. Vor allen in diesem Feld ist der internationale Charakter mitentscheidend für die Entwicklung des TIS, da die Mehrheit der UN-Staatengemeinschaft und allen voran die G20 sich der Bedeutung sowie Notwendigkeit von Wasserstoff für ihre Energiewenden bewusst sind. Dabei steht die Wasserstoff-Branche in ihrer Genese, was gleichermaßen den Aufbau von Infrastrukturen und die Entstehung eines internationalen Marktes bedeutet. Bezogen auf das TIS geht zudem ein stetiger und übergreifender Wissenstransfer sowie die Weiterentwicklung der Technologie einher. Die vertiefende Fokussierung auf grünen Wasserstoff beruht auf der umfangreichen Förderung erneuerbarer Energien im Hinblick auf die internationalen Klimaschutzziele. So sind die Potenziale, grünen Strom unter optimalen Bedingungen zu produzieren, vor allem im globalen Süden vorhanden und Südafrika zeichnet sich durch seine Strukturen und Gegebenheiten als strategisch wichtiger Partner für die H₂-

Produktion und -Vermarktung, insbesondere für Deutschland, aus. Im Zuge der weiteren Systemeingrenzung fällt folglich auch der Blick auf die strukturellen und systemischen Verhältnisse Südafrikas, weshalb nicht nur der regulatorische Rahmen, politische Strategien, Forschung und Entwicklung sowie Angebot- und Nachfrage nach Wasserstoff einbezogen werden, sondern auch die aktuell bestehende Energieinfrastruktur mit Hauptaugenmerk auf erneuerbare Energien. Gegenstand der Analyse sind somit Akteure mit Produktions- oder Abnehmerfunktion, Forschungs- und Ausbildungseinrichtungen, die Gesetzgebung inklusive politischer Strategien und die Bedingungen des Strommarktes. Da der Wasserstoff-Hochlauf und somit das Wissen sowie die Akteure global auftreten, werden folglich auch diese Interessen und Aktivitäten innerhalb der gesetzten geografischen Zielgrenze in ausgewogenem Maße betrachtet.

3 Strukturelle Komponenten im TIS

3.1 Kategorisierung in Akteursgruppen

Im Rahmen der Subanalysen werden die Akteure zusammengefasst und beleuchtet, die als relevante Stakeholder einen Teil zur Entwicklung des technologischen Innovationssystem beitragen können. Die Auswahl der strukturellen Komponenten erfolgte auf Basis von Auskünften von Hector Makgato (GIZ Südafrika²) und darauf aufbauend nach einer Analyse ausgewählter Publikationen mit dazugehöriger Internetrecherche.

Tabelle 1: Grundlegende Kategorisierung der strukturellen Komponenten (*Eigene Darstellung nach: Bergek et al. (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems, S. 408; Carlsson und Stankiewicz (1991): On the nature, function and composition of technological systems, S. 109*)

	Akteure	Netzwerke/Beteiligungen
Privat	▪ Bergbauunternehmen	National
	▪ Energieunternehmen	National und international
	▪ Technologieunternehmen	National
	▪ Projektierungsunternehmen	National und international
	▪ Forschungseinrichtungen	National und international
	▪ Abnehmersektoren	National
Staatlich-öffentlich	▪ Staatskonzerne	National
	▪ Regulierungsbehörden	Internationale Partnerschaften
	▪ Akademische und wissenschaftliche Einrichtungen	Nationale und internationale Kooperationen
Zivil-gesellschaftlich	Nichtregierungsorganisationen mit unterschiedlichen Schwerpunkten	National

Ausgehend von der Tabelle wird in drei verschiedene Akteursgruppen kategorisiert, die in ihrem systemischen Aktionsfeld einzeln, aber im Zuge der übergreifenden TIS-Theorie zusammen betrachtet werden. Die einzelnen Akteure zeichnen sich folglich durch unterschiedliche Kompetenzen und Funktionen aus und bilden darüber hinaus durch gemeinsame Interaktionen

² im Rahmen von Projektsitzungen von Global-H2-Uscaling zwischen IZES und GIZ

Netzwerke, die auf formeller oder auch informeller Grundlage bestehen. Die Unterscheidung in private Akteure, welche vor allem ökonomisch getrieben und maßgebend für die wirtschaftliche Entwicklung einer Volkswirtschaft sind, staatliche Akteure respektive Institutionen und zivile Organisationen, ist auf Grund ihrer Systemfunktionen bedingt. Die staatlichen Akteure haben als Institutionen einen starken funktionalen Hintergrund mit definierten Zielen. Mit ihrer auf Langfristigkeit ausgelegten Struktur, erfüllen sie im Grundsatz regulierende, informative und bildende Aufgaben und dienen damit vor allem gesellschaftlichen Zwecken. Mit ihrer Macht sowie Legitimität im Rahmen der Funktionalität und den daraus resultierenden Handlungen, zu denen auch die Ausarbeitung konkreter Gesetze oder die Entwicklung von Strategien zählen, tragen sie zur Minderung sozialer Unsicherheiten oder der Entschärfung von Konflikten zwischen unterschiedlichen Wertesystemen bei und besitzen damit eine entscheidende Lenkungswirkung im System. Einen Beitrag dazu leisten zudem die zivil-gesellschaftlichen NGOs, die insbesondere in Südafrika wesentlich für die Schaffung sozialer Gerechtigkeit sind. [2]

3.2 Auszug der wichtigsten strukturellen Komponenten im TIS und die Bedeutung von Netzwerken

Im Ergebnis können die wichtigsten strukturellen Komponenten für das TIS nach ihrem systemischen Aktionsfeld differenziert und aufgelistet werden. Die Tabelle stellt dabei nur einen Auszug der potenziell das TIS tangierenden Akteure dar.

Tabelle 2: Auswahl der wichtigsten strukturellen Akteure im TIS (Eigene Darstellung nach: DSI (2021): Hydrogen Society Roadmap, S. D ff.; GIZ (2016): Hydrogen Research Activities, S. 22 ff.; Makgato (2023a): Projektsitzung von Global-H₂-Upscaling am 24. Januar 2023; Makgato (2023b): Projektsitzung von Global-H₂-Upscaling am 31. Januar 2023; Makgato (2023c): Projektsitzung von Global-H₂-Upscaling am 06. März 2023)

Akteure	Rolle für das TIS
Anglo American Platinum	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Impala Platinum Holdings (Implats)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Sasol	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
ArcelorMittal	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
ENERTRAG South Africa	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Isondo Precious Metals	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Bambili Energy	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
HyPlat	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Hydrox Holdings	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
CHEM Energy SA	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Engie	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Siemens	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Hyena Energy	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Sibanye Stillwater	Primärer Akteur mit hohem Einfluss

Linde Engineering South Africa (Pty) Ltd.	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Cape Stack	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Eskom	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Transnet	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Petroleum, Oil and Gas Corporation of South Africa (PetroSA)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
National Energy Regulator of South Africa (NERSA)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Department of Mineral Resources and Energy (DMRE)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Department of Science and Innovation (DSI)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
Investment and Infrastructure Office (IIO)	Veto-Spieler
Department of Transport (DoT)	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Department of Basic Education (DoE)	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Department of Higher Education and Training (DHET)	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Council of Scientific and Industrial Research (CSIR)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
HySA-Institut mit drei Kompetenzzentren: Infrastructure mit North-West University (NWU) und CSIR, Catalysis mit University of Cape Town (UCT) und Council for Mineral Technology (MINTEK), Systems mit University of the Western Cape (UWC)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
South African National Energy Development Institute (SANEDI)	Primärer Akteur mit hohem Einfluss
non-HySA Universities	Primärer Akteur mit geringem Einfluss
Institute for Economic Justice (IEJ)	Sekundärer Akteur

Netzwerke unter den einzelnen Akteuren und Institutionen sind als Zwischenform der systemischen Organisation, also zwischen der internen Hierarchie einzelner Systemkomponenten und den tangierten Märkten, zu betrachten. Ihre Hauptfunktion besteht im Austausch von Wissen mit anderen Systemkomponenten. Die Bildung erfolgt durch Interaktionen, die in der Regel eher informell als formell sind und einen unterschiedlichen Charakter aufweisen. [2] So können als Interaktionen einerseits Geschäftsbeziehungen oder Kooperationen und andererseits Zusammenschlüsse zu Interessensgemeinschaften aufgefasst werden.

4 Funktionelles Muster und Systemgüte zur Bestimmung der Systemfunktionalität

Für die Darstellung des funktionellen Musters und der damit einhergehenden Eruierung der sieben Hauptfunktionen werden diese mit Hilfe von Studien und Berichten der verantwortlichen Institutionen auf Basis einer allgemeinen Literatur- und Internetrecherche analysiert und hinsichtlich des qualitativen beziehungsweise quantitativen Erfüllungsgrades bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand ausgewählter Indikatoren für die jeweiligen Hauptfunktionen und wird in entsprechenden Netzdiagrammen grafisch dargestellt. Die verwendeten Indikatoren werden aus den Arbeiten von Bergek et al. und Hekkert et al. sowie aus drei weiteren TIS-Studien von Esmailzadeh et al. (2020) [5], Furtado et al. (2020) [6] und Wandera (2020) [7], die auf Grund

ihrer Aktualität und ihrem Fokus auf erneuerbare Energien und Kraftstoffe in Entwicklungsbeziehungsweise Schwellenländern herangezogen werden, ausgewählt und auf maximal fünf pro Hauptfunktion begrenzt. Mit den entsprechenden Diagrammen werden den bis zu fünf unterschiedlichen Indikatoren Werte von 1 bis 5 zugeordnet und somit der Erfüllungsgrad eines Indikators innerhalb der Hauptfunktion ermittelt. 1 steht dabei für eine vollkommene Erfüllung der Indikatorleistung und 5 für einen mangelhaften, respektive unzureichenden Zielerfüllungsgrad.

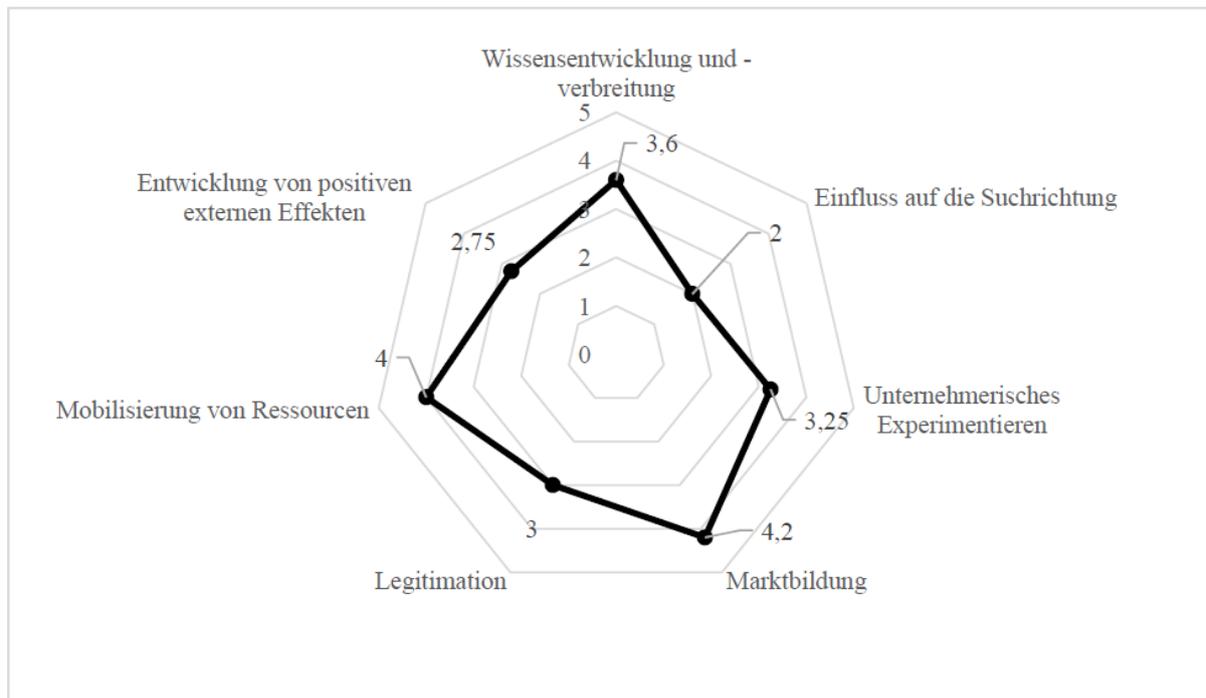


Abbildung 3: Bewertungsschema zu den sieben Primärfunktionen im TIS (Eigene Darstellung nach: Bergek et al. (2008): *Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems*, S. 410 ff. und Hekkert et al. (2011): *Technological Innovation System Analysis*, S. 10)

Für die Bewertung der Systemgüte ist die Bestimmung und Einordnung der Technologie in die Phase ihrer Entwicklung notwendig. Bergek et al. unterscheiden hier zwischen der Gestaltungs- und Wachstumsphase. Erstere zeichnet sich prinzipiell durch ihre hohe Unsicherheit im Technologiefeld und demnach auch auf dem Markt aus. Dahingegen zeigt sich in der Wachstumsphase eine Hochskalierung und Technologieverbreitung zu einem Massenmarkt. Unter Annahme der unterschiedlichen Entwicklungsphasen seitens Hekkert et al., befindet sich die Technologie und damit das System nach eigener Einschätzung in einem Zwischenstadium beider Phasen. Augenblicklich stehen im System primär die Aktivitäten zur Legitimation und Mobilisierung von Ressourcen im Vordergrund, was sich demnach auf die Bewertung des funktionellen Musters auswirkt. Die finale Bewertung des funktionellen Musters basiert auf den jeweiligen Indikatoren der Primärfunktionen und bildet damit den entsprechenden Mittelwert ab. Folglich sind vor allem die „Marktbildung“ und „Mobilisierung von Ressourcen“ Funktionen im TIS, die noch nicht die Leistung erbringen, welche von einem schnellwachsenden und zukunftssträchtigen System zu erwarten sind. Eine höhere Leistungsfähigkeit erreichen neben der „Legitimation“, auch das „unternehmerische Experimentieren“ sowie die „Wissensentwicklung und -verbreitung“, obgleich es bei den beiden Letztgenannten Indikatoren gibt, die sich auffallend negativ auswirken. Lediglich die beiden Funktionen „Einfluss auf die Suchrichtung“ und

„Entwicklung von positiven externen Effekten“ wirken sich sehr positiv auf das System aus und dienen somit der Entwicklung, Verbreitung und Nutzung der H₂-Technologie. Insgesamt betrachtet, ist das TIS in seiner Entwicklung und Funktionalität durch unterschiedliche, angeführte Gründe noch teilweise gehemmt. Dennoch kann in Anbetracht der Entwicklungsphase, in der sich das System befindet, geschlussfolgert werden, dass die systemischen Strukturen ein erhebliches Potenzial aufweisen und sich das Innovationssystem dadurch stark und schnell weiterentwickeln kann. Im Sinne der zu formulierenden Prozessziele ist es folglich entscheidend, wie die diversen Akteure agieren und wie sich ihre Bestrebungen sowie tatsächlichen Aktivitäten auf das funktionelle Muster und in besonderem Maße auf die Legitimation und Mobilisierung von Ressourcen auswirken. Gleichermaßen wird sich in der weiteren Genese zeigen, welchen positiven Einfluss die Netzwerke auf die Entwicklung nehmen können.

5 Hemmnisse und Multiplikatoren des TIS in Südafrika

In der weiteren Analyse werden die Hemmnisse und Multiplikatoren, die auf das TIS und seine Beschaffenheiten einwirken, ausgehend von dem nun vorliegenden Funktionsmuster sowie den darin herausgearbeiteten Erkenntnissen zusammengesetzt und zusammenfassend beleuchtet. Die antreibenden sowie hemmenden Mechanismen werden grundsätzlich durch interne und externe Faktoren beeinflusst, sodass sich erst im Verbund der einzelnen Kräfte, kausale Zusammenhänge zum TIS ergeben. Durch Interdependenzen zwischen den einzelnen Primärfunktionen können die Hemmnisse dabei zusätzlich verstärkt werden. Erweitert werden die diversen Kräfte durch die Formulierung von politischen Ansätzen, die als erster Indikator für politische Schlüsselfragen und Maßnahmen dienen. Im Verbund ergibt sich eine übergreifende Matrix zum TIS.

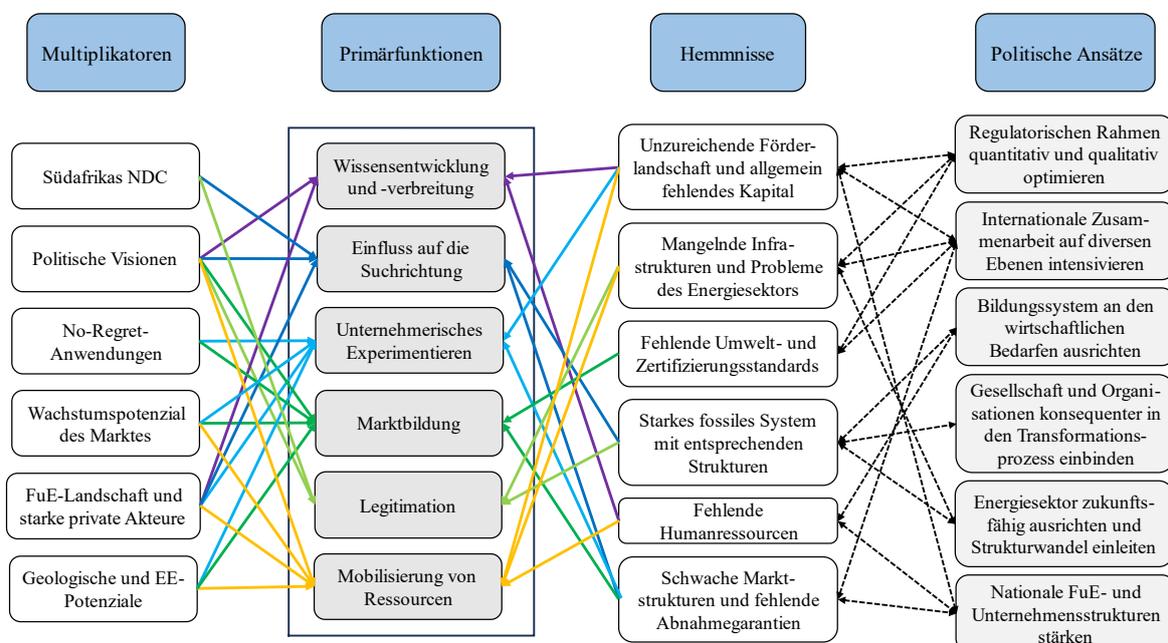


Abbildung 4: Analysematrix zu Hemmnissen und Multiplikatoren sowie den dazugehörigen politischen Ansätzen im TIS (Eigene Darstellung nach: Bergek et al. (2008): *Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems*, S. 422)

Die Matrix fasst, wie zuvor beschrieben, die internen wie externen Multiplikatoren, Primärfunktionen, innovationssystemischen Hemmnisse und die dazugehörigen politischen Ansätze zusammen. Dabei werden die Wirkungen der Multiplikatoren und Hemmnisse auf die jeweiligen Primärfunktionen herausgearbeitet und die politischen Ansätze zu den Blockademechanismen in Bezug gesetzt. Insgesamt ergeben sich jeweils sechs verschiedene Multiplikatoren, Hemmnisse, Ansätze und Funktionen. Die siebte Primärfunktion (Entwicklung von positiven externen Effekten) ist nicht explizit dargestellt, da sie bereits in die Multiplikatoren inkludiert ist.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Bearbeitung und tiefergehenden Analyse liefern ein zwiespaltiges Bild über den Entwicklungszustand des Wasserstoffsektors in Südafrika. Auf der einen Seite verfügt das Land über eine starke Basis zur Entwicklung des Sektors auf Grund der vorhandenen geologischen Ressourcen sowie den umfangreichen Potenzialflächen für erneuerbare Energien. Hinzukommt die bestehende und vielfältige Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Kombination mit starken Privatakteuren aus der Industrie, die als Vorreiter in der Adaption der Technik fungieren und gleichermaßen ihren Beitrag zur Fortentwicklung leisten. Positiv wirken sich zudem die politischen Bestrebungen und Visionen zur Etablierung einer H₂-Wirtschaft in Kombination mit dem prognostizierten Wachstumspotenzial des Marktes, den vorhandenen Optionen für No-Regret-Anwendungen sowie den vorgegebenen Klimabeiträgen Südafrikas aus. Auf der anderen Seite stehen jedoch gravierende energiesektorale Probleme, bedingt durch die betriebswirtschaftliche Schieflage Eskoms sowie im Zuge dessen eine unterentwickelte Energieinfrastruktur gegenüber. Darüber hinaus dominiert zum aktuellen Zeitpunkt ein auf fossilen Rohstoffen basierendes Wirtschaftssystem mit enger Vernetzung zum Sozialsystem und dementsprechend starke, sich der neuen, zunehmend grünen Entwicklung, widersetzende Strukturen. Damit einher gehen gegenwärtig auch schwache Marktstrukturen auf Grund begrenzter Akteursvielfalt sowie fehlende Anreize in der Förderlandschaft und ein ungenügendes Kapitalvolumen. Dieser Umstand wird zusätzlich durch fehlende Umwelt- und Zertifizierungsstandards sowie unzureichend qualifizierte Humanressourcen verstärkt. Eine weitere Erkenntnis ergibt sich aus der allgemeinen Betrachtung des bestehenden regulatorischen Rahmens unter Einbezug der relevanten politischen Strategien und Pläne. Gegenwärtig stehen die „Hydrogen Society Roadmap“ und „Green Hydrogen Commercialisation Strategy“ isoliert als Strategie Südafrikas zum H₂-Upscaling. Dabei tangiert die fortschreitende Wasserstoffentwicklung auch andere Pläne und Vorgaben, wie den „Integrated Resource Plan“, den „National Environmental Management Act“ und den „National Development Plan“, sodass es an Konnektivität fehlt und folglich zu wenig regulatorische Kohärenz gegeben ist. Übergreifend kann zudem konstatiert werden, dass die Entwicklungen zum aktuellen Wasserstoffhochlauf in Südafrika nicht primär durch die Nachfrage aus einem bestimmten Sektor getrieben sind, wie es in Deutschland offenkundig durch die Industrie oder den Verkehr der Fall ist, was politisches Handeln im Rahmen der Energiewirtschaft erzwingt, sondern sich vordergründig aus der Eigeninitiative privater Akteure und ihren Interessen innerhalb des Transportsektors sowie am potenziellen Exportmarkt speisen. Gerade hier zeigt sich die Bedeutung bilateraler Kooperationen wie zum Beispiel Energiepartnerschaften, die durch die Zusammenarbeit an einem gemeinsamen Ziel zur Überwindung dieser Hemmnisse beitragen können.

6 Referenzen

- [1] Matschoss, Patrick, et al (2021): Synthetische Kraftstoffe – Ökonomie, Gesellschaft, Nachhaltigkeit. In: FVEE Themen: Forschung für den Green Deal. Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2020. Hg. vom ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, Berlin.
- [2] Carlsson, Bo; Stankiewicz, Rikard (1991): On the nature, function and composition of technological systems. In: Journal of Evolutionary Economics (Volume 1, Issue 2), 93–118. Springer Science+Business Media LLC.
- [3] Bergek, Anna; Jacobsson, Staffan; Carlsson, Bo; Lindmark, Sven; Rickne, Annika (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. In: Research Policy 37 (3), S. 407–429. DOI: 10.1016/j.respol.2007.12.003.
- [4] Hekkert, Marko; Negro, Simona; Heimeriks, Gaston; Harmsen, Robert (2011): Technological Innovation System Analysis. A manual for analysts. Hg. v. Faculty of Geosciences. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation. Universiteit Utrecht.
- [5] Esmailzadeh, Mohammad; Noori, Siamak; Aliahmadi, Alireza; Nouralizadeh, Hamidreza; Bogers, Marcel (2020): A Functional Analysis of Technological Innovation Systems in Developing Countries: An Evaluation of Iran's Photovoltaic Innovation System. In: Sustainability 12 (5), S. 2049. DOI: 10.3390/su12052049.
- [6] Furtado, André Tosi; Hekkert, Marko P.; Negro, Simona O. (2020): Of actors, functions, and fuels: Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil. In: Energy Research & Social Science 70, S. 101706. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101706.
- [7] Wandera, Faith Hamala (2020): The innovation system for diffusion of small wind in Kenya: Strong, weak or absent? A technological innovation system analysis. In: African Journal of Science, Technology, Innovation and Development 13 (5), S. 527-539. DOI: 10.1080/20421338.2020.1771979.