

Study on 'Solar Fuels Research & Invest: Defining and developing the global solar fuel value chain: techno-economic analysis and pathways for sustainable implementation'

Executive Summary

Independent
Expert
Report

Written by EY, IMEC and RINA
October – 2020

EN

Study on 'Research and Innovation international cooperation in the field of renewable energy technologies' – Executive Summary

European Commission
Directorate-General for Research and Innovation
Directorate C - Clean Planet
Unit C.1 – Clean Energy Transition
Contact Thomas SCHLEKER
Email RTD-ENERGY-SR-MIS@ec.europa.eu
Thomas.Schleker@ec.europa.eu
RTD-PUBLICATIONS@ec.europa.eu
European Commission
B-1049 Brussels

Manuscript completed in 2020.

This document has been prepared for the European Commission, however it reflects the views only of the authors, and the European Commission is not liable for any consequence stemming from the reuse of this publication.

More information on the European Union is available on the internet (<http://europa.eu>).

PDF	ISBN 978-92-76-29917-2	doi:10.2777/105752	KI-03-21-074-3AN
-----	------------------------	--------------------	------------------

Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021

© European Union, 2021



The reuse policy of European Commission documents is implemented based on Commission Decision 2011/833/EU of 12 December 2011 on the reuse of Commission documents (OJ L 330, 14.12.2011, p. 39). Except otherwise noted, the reuse of this document is authorised under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) licence (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). This means that reuse is allowed provided appropriate credit is given and any changes are indicated.

For any use or reproduction of elements that are not owned by the European Union, permission may need to be sought directly from the respective rightholders.

Study on 'Solar Fuels Research & Invest: Defining and developing the global solar fuel value chain: techno-economic analysis and pathways for sustainable implementation'

Executive Summary

edited by

Antonio De Rose, EY

Nicholas Merriman, EY

Pauline Aymonier, EY

Joachim John, IMEC

Andrea Leoncini, RINA

Alessandro Venturin, RINA

Alena Shuba, EY

Jan Byttebier, EY

Alana Fitzpatrick, EY

Table of content

1. ABSTRACT.....	4
2. EXECUTIVE SUMMARY OF KEY STUDY RESULTS	5
2.1. Definition of solar fuels value chains	5
2.2. Roadmap for Solar Fuels and Market Outlook	6
2.2.1. Technology and economic roadmap for solar fuels.....	6
2.2.1. Market outlook for solar fuels for 2050 and 2100.....	9
2.3. Creation of an International Solar Fuel Forum.....	11
3. RÉSUMÉ.....	12
4. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DU PROJET	13
4.1. Analyse des chaines de valeur des combustibles solaires.....	13
4.2. Feuille de route des combustibles solaires et perspectives de marché	15
4.2.1. Feuille de route technologique et économique des combustibles solaires	15
4.2.2. Perspectives de marché pour les combustibles solaires en 2050 et 2100	18
4.3. Développement du Forum International sur les combustibles solaires (International Solar Fuel Forum).....	19
5. ZUSAMMENFASSUNG.....	21
6. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE DER STUDIE.....	22
6.1. Definition der Wertschöpfungsketten von Solarkraftstoffen	22
6.2. Fahrplan für Solarkraftstoffe und Marktausblick	24
6.2.1. Technologie- und Wirtschaftsfahrplan für Solarkraftstoffe.....	24
6.2.2. Marktausblick für Solarkraftstoffe für 2050 und 2100.....	27
6.3. Aufbau eines Internationalen Forums für Solarkraftstoffe	28

List of abbreviations

Abbreviation	Definition
AE	Alkaline Electrolysis
IPC	International Patent Classification
LCOE	Levelized Cost of Energy
MEA	Membrane Electrode Assemblies
MI	Mission Innovation Challenge
PBR	Photobioreactor
PEC	Photo-electrochemical electrolyser cell
PEM	Proton Exchange Membrane electrolyser
SMR	Steam Methane Reforming
SOE	Solid Oxide Electrolysis
TRL	Technology Readiness Level

1. ABSTRACT

This European Commission funded study provides a techno-economic analysis of global solar fuel value chains and pathways for sustainable implementation. It is structured around four key tasks providing: a techno-economic analysis of worldwide solar fuel value chains; a technological development roadmap for 2030 and 2050 and economic roadmap to 2100 as well as a market outlook mapping the full potential of solar fuels for 2050 and 2100; the International Solar Fuels Forum; and the organisation of an international conference on solar fuels. The study aims at identifying the key technological bottlenecks that need to be overcome to allow for the large-scale industrial production of solar fuels. Based on this, the cost competitiveness of a number of solar fuel technologies is assessed, together with their potential time-to-market to replace comparable fossil fuels. By forecasting the potential demand for solar fuels through 2100, the study gives an outlook on what role solar fuels could play in our future energy systems. The investments required to build capacity to meet this demand are also discussed. The study provides an analysis of the external factors that could impact the development and uptake of solar fuels worldwide.

2. EXECUTIVE SUMMARY OF KEY STUDY RESULTS

Using sunlight as energy source, solar fuels offer great potential to meet worldwide future energy demands. As depicted in Figure 1 below, they result from the conversion of sunlight into fuels such as methanol or hydrogen. They can be easily stored to respond to fluctuating energy needs and can be used for different applications in the transport, building and industrial sectors. Solar fuels can be produced through different technological pathways, namely Electrochemical, Chemical, Thermochemical and Biochemical processes. The market for solar fuels is nevertheless still at an early development stage. Reaching large-scale production of solar fuels will necessitate a coordinated approach relying on experts from diverse fields and integrating knowledge regarding technological developments, industrial scale-up and market acceptance.

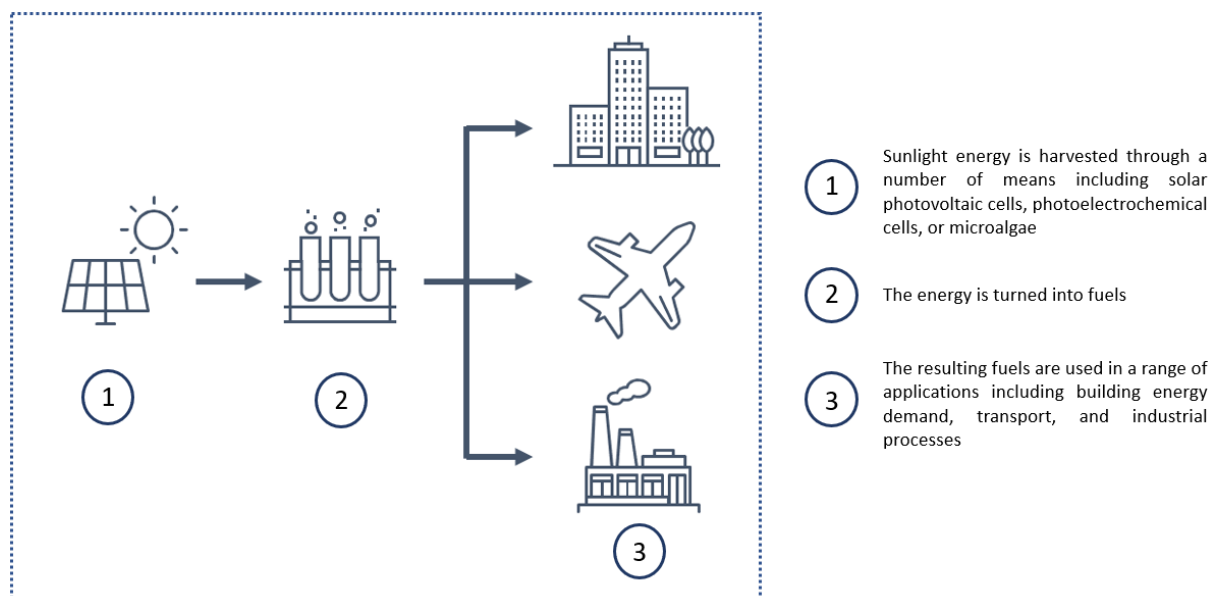


Figure 1 – Solar Fuel Value Chain

In this perspective, the European Union has at COP21 joined Mission Innovation with the aim of reinvigorating and accelerating global clean energy innovation, notably looking at the potential of solar fuels produced through different technological approaches and pathways. This was part of the European Union's overarching pledge to decarbonise its society and economy and commitment to the role of worldwide champion in renewable technologies. Considering solar fuels as a potential "game changer", the European Commission, co-chairing the Converting Sunlight Innovation Challenge, launched a qualitative and quantitative assessment of solar fuels' value chains and the development of a forward-looking techno-economic international roadmap.

This sets the context of this European Commission funded study on 'Solar Fuels Research & Invest: Defining and developing the global solar fuel value chain: techno-economic analysis and pathways for sustainable implementation', conducted by a Consortium composed of EY, IMEC, RINA and CEPS.

2.1. Definition of solar fuels value chains

The study has analysed key solar fuel value chains through four specific production pathways: Chemical, Electrochemical, Thermochemical and Biochemical. For each technological pathway, the main technological components associated with their fuel production processes were outlined in a qualitative manner, identifying the various raw materials and resources needed for each technology to produce a specific solar fuel. This categorisation was conducted for the following pathways and technologies:

- Electrochemical pathway: Alkaline Electrolysis ("AE"), Proton Exchange Membrane electrolyser ("PEMEC"), Photo-electrochemical electrolyser cell ("PEC")

- Thermochemical pathway: Solid Oxide Electrolyser Cell ("SOEC")
- Chemical pathway: Artificial Photosynthesis ("Artificial Leaf")
- Biochemical pathway: Biohybrid system ("Bionic Leaf"), Microalgae

The aim of this qualitative analysis and selection was to focus on the most relevant value chains in terms of their potential for technological and economic improvements. It provided the basis for the economic and quantitative analysis of the technologies' value chains. The quantitative analysis included additional promising technologies which were covered under the Hydrogenation and Methanation pathways. The value chain analysis was performed based on a Levelized Cost of Energy ("LCOE") economic modelling exercise, decomposing the LCOE variables into a set of value chain components including capital expenditures ("CAPEX"), overhead and maintenance, production costs including labour and energy input costs, and considering the valorisation of certain by-products. The analysis was carried out for the year 2020 and per fuel, for example looking at all relevant technologies producing hydrogen, and allowed for the comparison of green solar technologies against their fossil-based counterparts.

The analysis revealed that production costs, comprising primarily energy input costs, are the key driver of technologies' current LCOE in most pathways, namely Electrochemical, Thermochemical, Hydrogenation and Methanation. The energy inputs to the Electrochemical and Thermochemical pathways consist in electricity derived from solar PV, whose costs themselves are primarily driven by CAPEX. The capital expenditures for solar PV are therefore embodied in the costs of green hydrogen produced through the Electrochemical and Thermochemical pathways, and end up determining a substantial portion, up to 60 percent, of the costs of green hydrogen. The costs of green hydrogen represent 87 percent and 93 percent of the LCOE for fuels produced through the Hydrogenation and Methanation pathways in 2020, respectively, thereby implying that the capital expenditures for solar PV are indirectly responsible for over half of the LCOE for solar fuels produced through the Hydrogenation and Methanation pathways.

CAPEX is the highest cost component for SOEC and mainly for microalgae, reflecting the low maturity level of both technologies. In this context, microalgae also experiences high overhead and maintenance costs, reflecting its experimental nature.

One clear observation emanating from the value chain and LCOE analysis is the cost advantage that fossil fuel technologies, including steam methane reforming and the methanol process, benefit from compared to their green counterparts. Another key takeaway is that the current cost of solar fuels is mostly driven by the high CAPEX associated with solar PV, despite significant cost reductions in the past decade. Therefore, achieving low cost solar PV is a key objective for making solar fuels competitive.

This analysis therefore provides a snapshot of the current state of the studied technologies' value chains, in the form of a decomposed LCOE. The LCOE model also allows for a forward-looking time-series analysis through 2100, estimating performance of the technologies over time and assessing at which point in time the green technologies could overcome the cost competitiveness of their fossil counterweights. This analysis is presented in the next section of this study, drawing a technological roadmap (for 2030 and 2060) and economic roadmap (through 2100) for all studied technologies.

2.2. Roadmap for Solar Fuels and Market Outlook

2.2.1. Technology and economic roadmap for solar fuels

The study provides a technological roadmap for solar fuel technologies for 2030 and 2050 as well as an economic roadmap for solar fuels through 2100. The technological roadmap

for 2030 and 2050 aimed at assessing the main technological challenges and bottlenecks that must be overcome to reach the production of solar fuels at commercial scale.

Starting with the identification of key technologies under the chemical, electrochemical, thermochemical and biochemical pathways, the analysis determines the current Technology Readiness Level ("TRL") of the components of each technology. The study then focuses on identifying the main challenges linked to each component and to the system as a whole: this phase entails a SWOT analysis and a patent analysis, where possible. The main outcomes of the technological roadmap present the estimated TRL advancements towards 2030 and 2050, including the major actions to be carried out in order to move forward to the commercial scale of the technologies.

The economic roadmap, building on the technological roadmap, accounts for the results of technological improvements in the solar fuel pathways by modelling the expected LCOE for each technology. Two scenarios for the development of solar fuels are contemplated: the first models relatively stable levels of investment in solar fuel pathways, whereas the second foresees a significant investment push, thereby accelerating the time to market for solar fuels. The latter scenario, which we have labelled as "scale", foresees significant investments in solar fuel technologies, even prior to solar fuels becoming cost-competitive with fossil fuels.

Technology roadmap

- *Electrochemical pathway*

The Proton Exchange Membrane electrolyser ("PEMEC") technology is used in the electrochemical pathway of solar fuels in combination with photovoltaics. The state-of-the-art TRL of PEMEC has been identified to be between 7 and 8. The advantages of PEMEC are the fast response time, that makes it very attractive to work with intermittent renewable electricity sources and the high purity of the product gases. This technology has the potential to reach full market availability within 5 years. Upscaling to GW production requires the strong reduction or substitution of noble metal catalysts like PGM. There are two ways to address this bottleneck. One is the mitigation from proton exchange membrane to hydroxyl exchange membranes and thus operations in alkaline instead of acidic electrolytes. This will reduce the pressure on the electrode/catalyst material because more abundant metals could be applied. On the other hand, it shifts the development effort towards the membrane, because hydroxyl exchange membranes are not commercially available with the same TRL than proton exchange membranes. The other possibility to accelerate the PEMEC technology would be the strong reduction of Platinum Group Metals ("PGM") catalysts by novel material technologies like core shell nanoparticles or novel thin film process technologies where only a fraction of the noble metal catalysts is needed.

The SOEC technology is used in the electrochemical pathway of solar fuels in combination with photovoltaics. The state-of-the-art TRL of the SOEC technology is determined to be between 6 and 7. This means that prototypes have been tested in the field and in compliance with intended working conditions. Due to the high system temperature, co-electrolysis with CO₂ is possible. As a product, syngas (CO+H₂) could be utilised in combination with a Fischer-Tropsch process directly into higher hydrocarbons like synthetic kerosene or synthetic diesel. Key bottlenecks towards market implementation are mainly the stability of the solid oxide membrane and the high operation temperature. Long ramp up time due to the high operation temperature prevents the direct coupling with highly intermittent renewable electricity sources like solar and wind. In the future, when battery cost further drops, low cost batteries can be used to buffer and provide a constant electricity supply. Material development and reactor design effort is needed to make this technology available for the market within the next 10 years. Market

availability will also depend on the integration of low-cost batteries to keep the system in operation for low renewable power generated at night, with clouds or low wind.

The state of the art of the PEC technology within the electrochemical pathway of solar fuels is determined to be between 3 and 4. This means that small-scale prototype of the system or sub-systems are developed in laboratory. The bottlenecks/critical issues to overcome to obtain a stable system and provide prototype operations is corrosion, which occurs with all materials over long periods of time, and catalyst poisoning. This is caused by the introduction of solution impurities, and it has been shown that low concentrations of impurities can have a huge impact on electrode efficiency and changes to the composition and morphology (structure/structural features) of the electrode can decrease their efficiency. Within the next 10 years this technology will successfully demonstrate prototyping. But then the challenge will come with the upscaling of the technology to proof operations in the field under real conditions. For that, large-scale processing methods are required like roll to roll production and high-volume deposition techniques. This technology will be applied in stand-alone systems for households or local energy communities. We expect a market introduction of this technology in the 2040s.

- *Chemical pathway*

The state of the art TRL of the Photocatalytic particulate or colloidal systems technology is determined to be between 2 and 3. This means the technical analysis of the concept is investigated and partially the technological concept is experimented and validated at laboratory scale. The first bottlenecks/critical issues to overcome towards a proof of concept system are the development of a gas separation membranes, ionic charge carrier mediators and materials that provide process stability, high catalyst efficiency and high photosensitivity. A breakthrough for this technology will be the development of self-assembled and self-repairing nanomaterials. After the prototyping is demonstrated the upscaling challenge needs to be addressed. The same constraints to the materials apply like in the PEC upscaling challenge. For that, large-scale processing methods are required like roll to roll production and high-volume deposition techniques. This technology will be applied in standalone systems for households or local energy communities. We expect market introduction of these systems in the 2050s.

- *Thermochemical pathway*

Solar thermochemical hydrogen production systems are based on two-step processes at high-temperature ($>1000^{\circ}\text{C}$) involving thermal decomposition and subsequent re-oxidation of metal oxides. They are composed of a concentrated solar system and a reactor for thermochemical reactions, the former being available at high maturity (TRL 7-9) and the latter (redox materials and reactor absorber) at pilot scale only (TRL 5-7). The overall TRL of the system results therefore in the range 5-7, with main technological issues related to materials suitable for high-temperature, durability and hydrogen yield, and to reduction of temperatures and production costs. The developed technological roadmap foresees by 2025 the identification of suitable materials, achieving demonstration at TRL 6, improvement of competitiveness and demonstration at TRL 7 by 2030 and full-scale demonstration around 2035, with commercial deployment in years up to 2050.

- *Biochemical pathway*

In the biohybrid systems a photoelectrochemical cell provides reducing equivalents in the form of e.g. hydrogen molecules or electrons to engineered bacteria, which are able to use them to produce targeted chemicals through metabolic pathways. Although similar devices aiming to produce e.g. fine chemicals have been developed, this technology for solar fuels production is currently deployed at very low TRL (TRL 2-3): several improvements are thus needed, especially concerning reactor design and configuration, durability of materials employed in the photoelectrochemical section, metabolic efficiencies and integration of the different components within the overall system.

Although microalgae-based systems have already reached a commercial-scale production of added-value compounds such as nutraceuticals, cosmetics, pigments, food ingredients, an effective market deployment of microalgae-based solar fuels still entails several challenges, especially from an economic perspective due the high production costs. In this context, further technical improvements are needed (e.g. in the cultivation systems, in the harvesting processes, in the biofuels production), with the specific target to investigate system's configurations enabling to valorise side-streams in a circular economy approach as well as to co-produce high-value compounds along with biofuels (e.g. bioethanol, biodiesel, biogas/biomethane).

Economic Roadmap

An economic roadmap for solar fuels was developed, as a continuation to the technology roadmap which analysed the key challenges, bottlenecks and opportunities that could pace solar fuel technologies' development over time.

In this context, the economic roadmap aimed at analysing the economic and cost-competitiveness of the different pathways for solar fuel production. The objective was to study the cost performance of the technologies over time, and to assess at which point in time they could become cost competitive with their fossil counterparts. The economic roadmap analysis was carried out through a time series LCOE analysis through 2100, looking at the competitiveness of the different technologies in producing different fuels, namely hydrogen, methanol, ethanol and methane. The analysis looked at the technologies' developments under two investment scenarios: a stable scenario characterised by normal investment levels, and a scale scenario foreseeing an investment push in the studied technologies.

Looking at the hydrogen technologies, the analysis demonstrated that while AEC currently benefits from a cost-advantage amongst the green hydrogen technologies, PEMEC stands out as the most promising technology due to its cost competitiveness over time, under the two scenarios. PEMEC is expected to surpass its fossil benchmark, SMR, as early as 2039 under a scale scenario. Regarding methanol production, CO₂ hydrogenation could reach cost parity with its fossil benchmark, motor gasoline, in 2053 under a stable scenario. With rapidly rising gasoline prices, CO₂ hydrogenation could become market competitive as of 2042 with an investment push. Against this, microalgae for ethanol production remains less affordable than motor gasoline through 2100, reflecting the low maturity and relative inefficiency of the technology. Power-to-methane also comes out as a promising technology expected to reach cost parity with natural gas in 2060 under a scale scenario.

Our analysis therefore identified PEMEC, CO₂ hydrogenation and power-to-methane as key solar fuel technologies which are expected to reach market competitiveness with their fossil benchmarks to 2060. This analysis is complemented by our market outlook for solar fuels and solar fuel technologies through 2100. The analysis foresees the future potential demand for solar fuels and required investments in the PEMEC, CO₂ hydrogenation and power-to-methane technologies necessary to meet this forecasted demand.

2.2.1. Market outlook for solar fuels for 2050 and 2100

A market outlook for solar fuels was developed to assess the potential contribution of solar fuels to worldwide decarbonised energy systems in 2050 and 2100. The analysis comprised a forecast of final energy consumption, broken down by region (Africa, Asia, Australia and New Zealand, Europe, North America, and South America), by sector (industry, transport, buildings, and other) and by fuel type (biomass, coal, e-fuels, electricity, gas, heat, hydrogen, and oil). Both hydrogen and E-fuels, i.e. synthetic fuels

manufactured from green hydrogen and CO₂, were considered to be solar fuels for the purpose of the analysis.

The analysis considered three scenarios for the development of worldwide energy systems: a Reference scenario, assuming a baseline level of effort toward decarbonisation corresponding to current efforts; a 2°C scenario, where efforts are made to limit global temperature rises to 2100, relative to pre-industrial levels, by no more than 2°C, and a 1.5°C scenario.

In the 2°C scenario, solar fuels would be expected to contribute to 3.8 percent of our energy needs worldwide in 2050, and 5.8 percent in 2100. Looking at individual sectors, for the 2°C scenario, we foresee solar fuels contributing to just 0.8 percent of energy needs in industry in 2050, and 1.5 percent in 2100. In transport, our analysis expects solar fuels to contribute to 11 percent of energy demand in 2050, rising to 15.2 percent in 2100. Finally, in buildings, solar fuels can be expected to contribute to 3.1 percent of final consumption in 2050, and 4.7 percent in 2100.

Evidence gathered through stakeholder workshops held as part of this study, and through literature review, reveals a number of factors that could impact the uptake of solar fuels worldwide, including:

- Costs of solar fuels, which are primarily driven by the price of solar electricity at first vs. costs of comparable fossil fuels,
- Costs of adapting end-use systems to solar fuels, such as changing from coal to hydrogen in steel manufacturing,
- Infrastructure costs,
- Demand for carbon-neutral industrial products, vehicles and transportation services, and heating and cooling technologies in buildings, and
- Supportive regulations and policies such as those implementing carbon pricing mechanisms.

Industry, in particular, could potentially become early adopters of solar fuel technologies in certain applications. As industries are increasingly considering carbon capture and storage schemes, CO₂ may become more readily available, and could serve as an input to solar fuel production. These solar fuels could be produced and used on-site to power the same CO₂-emitting industrial processes, thereby closing the carbon loop. Such schemes, with the right incentives, could prove attractive to industries, driving them to invest in early-stage technologies.

The analysis provides a detailed outlook for Africa in particular, for which a slightly lower contribution from solar fuels is expected. Some of the reasons for this include a high cost of capital in Africa as well as high costs for utilizing solar fuels in end-use applications. This is especially true for hydrogen—even though it is expected to reach market maturity sooner than other solar fuels, the cost to businesses, developers, and vehicle owners and operators to adapt their industrial processes, buildings and vehicles to run on hydrogen remain very high. Nevertheless, the lack of legacy infrastructure in many parts of Africa, coupled with its high solar irradiance factor, make it an ideal target for investment in solar fuels. The development of local solar fuel supply chains could spark greater local demand, and contribute to increasing the contribution of solar fuels to Africa's energy needs at a greater pace than originally expected.

2.3. Creation of an International Solar Fuel Forum

The International Solar Fuel Forum is focused on developing a strong worldwide communication network to stimulate expert awareness and information exchange on solar fuels, in support to the research and findings of the study. The International Solar Fuel Forum created for this purpose brought together international stakeholders of scientific experts, authorities, industry stakeholders and civil society actors to discuss research and investment in solar fuels.

The Solar Fuel engagement and communication strategy created is composed of many different elements which reflect the project scope and specifications. It details the various tools, methods and actions taken to successfully build and engage with a solar fuel communication network, while accounting for contextual factors during the implementation.

Building the Solar Fuel Communication Network required three main foundational elements. Attention to privacy and data protection was vital, to ensure that the network had the appropriate data protection measures in place. The privacy policy created for the project and the way of contacting stakeholders guaranteed the privacy and confidentiality of the data collected from stakeholders. A detailed communication action plan was developed to map relevant stakeholders and contact them about the project. This facilitated the creation of the network and encouraged multipliers to share the information about the project with their own networks. Lastly having a central visual identity was crucial for project visibility and recognition among stakeholders.

To these three elements were added the key tools to build the network: the Webex technical solution to host the activities of the network, and the project landing page. The EY project landing page was the central point for registration to the project, with information on the study and the privacy policy considerations to collect the details of those interested. Furthermore, the technical platform of Webex Meetings and Webex Teams hosted the International Solar Fuel Forum and the virtual workshops. With multiple useful features for hosting international videoconferences and virtual chat spaces, Webex provided the user-friendly accessible environment needed to start discussions.

Contextual factors played a role in further shaping the communication network. The global outbreak of the COVID-19 virus and the national confinement measures taken to curb the spread of the virus changed the communication environment. To respect physical distancing, more communication moved to the digital realm, resulting in a busier and more crowded environment. In addition, the participants who joined the project were from international locations around the world, which was factored into the scheduling of the workshops by varying the start times for the different time-zones.

Engaging with the Solar Fuel Communication Network was done through four main activities. The email network was the main point of contact with the stakeholders to disseminate updates about the project and invitations for the activities. The Forum on Webex Teams was the central discussion area available for stakeholders and served as a source of information on the project activities. The Solar Fuel Survey created direct stakeholder participation in the study methodology, input data and pathways, which also fed into the discussions at the workshops. Lastly, the virtual workshops were the main stakeholder engagement point, consisting of presentations and discussions via virtual videoconferencing.

The Solar Fuel Communication Network created exists on Webex Teams as the International Solar Fuel Forum, and as a database of 70 registered stakeholders. These stakeholders could still be contacted in the context of the project by the European Commission, if there is a desire to continue with the Network.

3. RÉSUMÉ

Cette étude financée par la Commission européenne fournit une analyse technico-économique des chaînes de valeur mondiales des combustibles solaires et des voies de leur mise en œuvre durable. Elle s'articule autour de quatre tâches principales : une analyse technico-économique des chaînes de valeur mondiales des combustibles solaires ; une feuille de route pour le développement technologique en 2030 et 2050 et une feuille de route économique jusqu'en 2100 ainsi qu'une perspective du marché estimant le potentiel des combustibles solaires en 2050 et 2100 ; le Forum international des combustibles solaires ; et l'organisation d'une conférence internationale sur les combustibles solaires. L'étude vise à identifier les principaux obstacles technologiques qui doivent être surmontés pour permettre la production industrielle à grande échelle des combustibles solaires. La compétitivité en termes de coûts de différentes technologies de production a ensuite été évaluée, ainsi que les délais possibles de commercialisation pour remplacer les combustibles fossiles. En estimant la demande potentielle de combustibles solaires jusqu'en 2100, l'étude donne un aperçu du rôle que ces combustibles pourraient jouer dans nos futurs systèmes énergétiques. Les investissements nécessaires pour renforcer les capacités de production et pour répondre à cette demande sont également abordés. L'étude fournit une analyse des facteurs externes qui pourraient avoir un impact sur le développement et l'adoption des combustibles solaires dans le monde.

4. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DU PROJET

En utilisant la lumière du soleil comme source d'énergie, les combustibles solaires offrent un grand potentiel pour répondre aux futures demandes énergétiques mondiales. Comme le montre le schéma 1 ci-dessous, elles résultent de la conversion de la lumière du soleil en carburants tels que le méthanol ou l'hydrogène. Ils peuvent être facilement stockés pour répondre à des besoins énergétiques fluctuants et peuvent être utilisés pour différentes applications dans les secteurs des transports, du bâtiment et de l'industrie. Les combustibles solaires peuvent être produits par différentes voies technologiques, comme des procédés électrochimiques, chimiques, thermochimiques ou biochimiques. Le marché des combustibles solaires est cependant encore à un stade de développement précoce. Pour parvenir à une production des combustibles solaires à grande échelle, il faudra adopter une approche coordonnée faisant appel à des experts de divers domaines, intégrant les connaissances relatives aux développements technologiques, au développement industriel des technologies et à leur acceptation sur le marché.

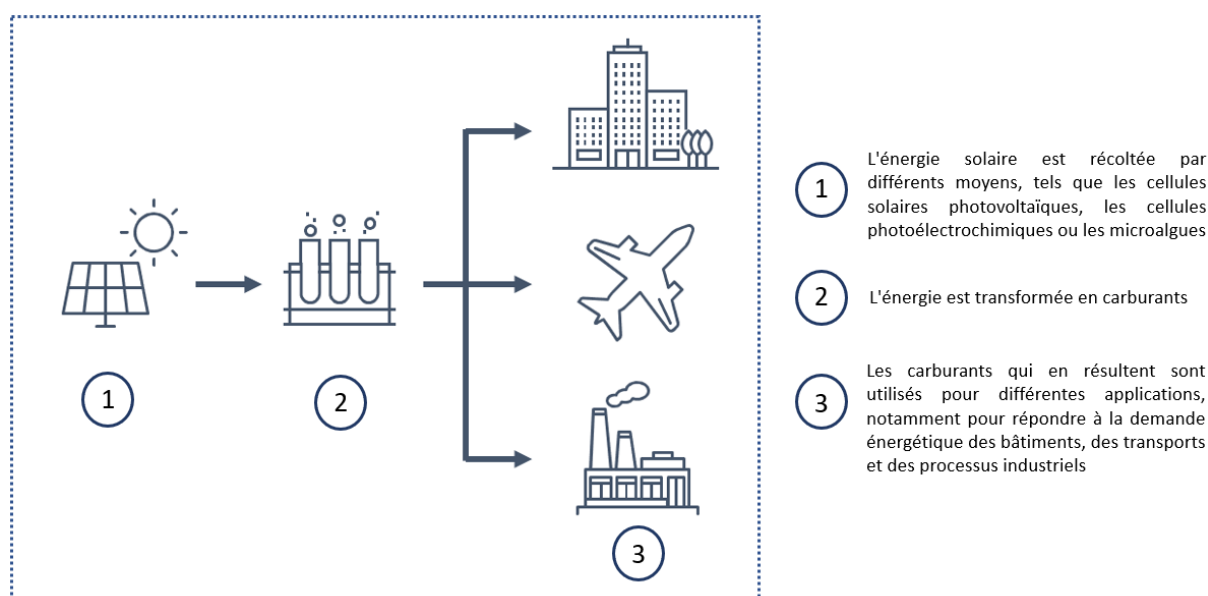


Schéma 1 - Chaîne de valeur des combustibles solaires

Dans cette perspective, l'Union Européenne a rejoint Mission Innovation lors de la COP21, dans le but d'accélérer l'innovation mondiale en matière d'énergie propre, notamment en examinant le potentiel des combustibles solaires produits par différentes approches et voies technologiques. Ceci fait partie de l'engagement de l'Union Européenne à décarboniser sa société et son économie et de son positionnement en tant que champion mondial des technologies renouvelables. Considérant le fort potentiel des combustibles solaires, la Commission Européenne, coprésidente du projet "Converting Sunlight Innovation Challenge", a lancé une évaluation qualitative et quantitative des chaînes de valeur des combustibles solaires et l'élaboration d'une feuille de route internationale technico-économique.

Ceci définit le contexte de cette étude financée par la Commission Européenne sur la recherche et l'investissement dans les combustibles solaires : Définir et développer la chaîne de valeur mondiale des combustibles solaires : analyse technico-économique et pistes pour une mise en œuvre durable", menée par un consortium composé de EY, IMEC, RINA et CEPS.

4.1. Analyse des chaînes de valeur des combustibles solaires

La première partie de l'étude consiste à analyser les principales chaînes de valeur des combustibles solaires à travers quatre filières de production spécifiques : chimique, électrochimique, thermochimique et biochimique. Dans un premier temps, nous avons identifié et présenté de manière qualitative les principaux composants technologiques

associés au processus de production de chaque filière technologique. Ces composants incluent notamment les différentes matières premières et ressources nécessaires à chaque technologie pour produire un combustible solaire spécifique. Cette catégorisation a été effectuée pour les filières et technologies suivantes :

- Voie électrochimique : l'électrolyse alcaline ("AE"), l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons ("PEMEC"), la cellule photo-électrochimique ("PEC") ;
- Voie thermochimique : la cellule d'électrolyse à oxyde solide ("SOEC")
- Voie chimique : la photosynthèse artificielle ("Artificial Leaf")
- Voie biochimique : Le système biohybride ("Bionic Leaf"), les microalgues

L'objectif de cette analyse qualitative était de sélectionner et de se concentrer sur les chaînes de valeur les plus pertinentes en termes de potentiel d'améliorations technologiques et économiques. Elle a servi de base à l'analyse économique quantitative des chaînes de valeur qui a suivi. L'analyse quantitative a évalué d'autres technologies complémentaires et prometteuses, regroupées dans les filières de l'hydrogénation et de la méthanisation. Elle a été réalisée sur la base d'un exercice de modélisation économique du coût actualisé de l'énergie ("Levelised Cost of Energy" ou "LCOE"), qui repose sur un ensemble de composantes de la chaîne de valeur des technologies analysées. Ces composantes comprennent notamment les dépenses d'investissement de capital ("CAPEX"), les frais généraux et de maintenance, les coûts de production (y compris les coûts de la main-d'œuvre et de l'énergie) et la valorisation de certains sous-produits. L'analyse a été réalisée pour l'année 2020 et par combustible, permettant par exemple d'examiner toutes les technologies solaires pertinentes pour la production d'hydrogène et de les comparer à leurs homologues à base de combustibles fossiles.

L'analyse a révélé que les coûts de production, comprenant principalement les coûts énergétiques, sont la principale composante du coût actualisé de l'énergie ("LCOE") des technologies électrochimique, thermochimique, de l'hydrogénation et de la méthanisation. Ces coûts énergétiques représentent principalement le coût de l'électricité produite par le photovoltaïque, lui-même affecté par les évolutions liées aux investissements de capital ("CAPEX") du photovoltaïque. Les dépenses d'investissement pour le photovoltaïque sont donc intégrées dans le coût de l'hydrogène propre, produit par les filières électrochimique et thermochimique, et représentent jusqu'à 60% de ce coût. En 2020, le prix de l'hydrogène vert représente 87 % du coût actualisé de l'énergie ("LCOE") des combustibles produits par hydrogénation et 93 % pour la méthanisation. Ceci indique que les dépenses en capital du photovoltaïque sont indirectement responsables de plus de la moitié du coût actualisé de l'énergie ("LCOE") des combustibles solaires produits par hydrogénation et méthanisation.

Les dépenses d'investissement de capital ("CAPEX") représentent un coût élevé pour la cellule d'électrolyse à oxyde solide ("SOEC") et d'autant plus pour les microalgues. Ceci reflète le faible niveau de maturité de ces deux technologies. Les microalgues font également face à d'important frais généraux et de maintenance, reflétant la nature expérimentale de la technologie.

Une observation clé de cette analyse est l'avantage en termes de coût dont bénéficient les technologies à combustibles fossiles, comme le reformage du méthane à la vapeur ("SMR") et la technologie de traitement du méthanol ("Methanol Process"), par rapport aux technologies vertes. Un autre élément clé est que le coût actuel des combustibles solaires est principalement dû aux importantes dépenses en capital ("CAPEX") du photovoltaïque, malgré une réduction notoire de ces coûts au cours de la dernière décennie. Par conséquent, la baisse des coûts du photovoltaïque est une étape clé pour rendre les combustibles solaires compétitifs.

Cette étude établit donc un aperçu des chaînes de valeur de la production de combustibles solaires, sous la forme d'une analyse décomposée du coût actualisé de

l'énergie ("LCOE") des technologies concernées. Le modèle économique développé pour cette étude permet également d'évaluer la performance de ces technologies en termes de coûts, jusqu'en 2100. Il permet d'identifier les dates clés où les technologies vertes de combustibles solaires pourraient devenir compétitives face aux technologies fossiles. Cette analyse est présentée dans la partie suivante de cette étude qui établit une feuille de route technologique (pour 2030 et 2050) et économique (jusqu'en 2100) du développement des technologies étudiées.

4.2. Feuille de route des combustibles solaires et perspectives de marché

4.2.1. Feuille de route technologique et économique des combustibles solaires

L'étude établit une feuille de route technologique des technologies de production des combustibles solaires pour 2030 et 2050, ainsi qu'une feuille de route économique pour les combustibles solaires jusqu'en 2100. L'analyse technologique pour 2030 et 2050 visait à évaluer les principaux défis et obstacles technologiques devant être surmontés pour parvenir à la production de combustibles solaires à l'échelle commerciale.

Commencant par l'identification des technologies clés dans les filières de production chimique, électrochimique, thermochimique et biochimique, l'analyse a déterminé le niveau actuel de maturité technologique ("Technology Readiness Level" ou TRL) des composants de chaque technologie. L'étude se concentre ensuite sur l'identification des principaux défis liés à chaque composant et aux systèmes dans leur ensemble. Cette phase implique plusieurs étapes. Tout d'abord, une analyse « SWOT » des atouts, faiblesses, opportunités et menaces au développement des technologies, suivie par une analyse des brevets. La feuille de route technologique présente ensuite les avancées estimées concernant la maturité des technologies, en 2030 et 2050. Elle présente également les principales actions à mener pour assurer le développement des technologies à l'échelle commerciale.

La feuille de route économique, qui s'appuie sur la feuille de route technologique, présente le résultat des améliorations technologiques en termes d'évolution du coût actualisé de l'énergie ("Levelised Cost of Energy" ou "LCOE") des technologies. Deux scénarios de développement des combustibles solaires sont envisagés : le premier modélise un niveau d'investissement relativement stable dans les technologies, tandis que le second prévoit une poussée significative des investissements, accélérant ainsi l'entrée sur le marché des combustibles solaires. Ce dernier scénario, que nous avons nommé "scénario d'échelle", prévoit des investissements importants dans les technologies des combustibles solaires, avant même que les combustibles solaires ne deviennent compétitifs par rapport aux combustibles fossiles.

Feuille de route technologique

- *Voie électrochimique*

La technologie de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons ("PEMEC") est utilisée dans la voie électrochimique des combustibles solaires en combinaison avec le photovoltaïque. Le niveau de maturité de la technologie est estimé entre 7 et 8. Un des avantages de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons est le temps de réponse rapide de la technologie, qui rend son utilisation très intéressante avec des sources d'électricité renouvelables intermittentes. Un autre avantage est la grande pureté des gaz produits. Nous estimons que cette technologie pourrait devenir disponible sur le marché à part entière dans les 5 ans à venir. La production d'échelle nécessiterait toutefois une forte réduction ou le remplacement des catalyseurs à base de métaux nobles comme les platinoïdes. Il existe deux moyens de surmonter ces obstacles. Le premier est le remplacement des membranes échangeuses de protons par des membranes échangeuses d'hydroxydes et donc des opérations dans des électrolytes alcalins au lieu de milieux acides. Cela permettrait de réduire les problèmes de capacité liés aux matériaux utilisés pour l'électrode/catalyseur, des métaux plus abondants pouvant être appliqués. D'autre part, ceci redirigerait l'effort de développement vers la

membrane, les membranes échangeuses d'hydroxyle n'ayant pas le même niveau de maturité que les membranes échangeuses de protons. Une autre possibilité afin d'accélérer le développement de la technologie serait de limiter au maximum l'utilisation, au niveau des catalyseurs, de métaux du groupe du platine ("PGM") grâce à de nouvelles technologies de matériaux comme les nanoparticules à noyau/enveloppe ou de nouvelles technologies de procédés en couche mince où seule une fraction des catalyseurs à base de métaux nobles est nécessaire.

La technologie de la cellule d'électrolyse à oxyde solide ("SOEC") est utilisée dans la filière électrochimique des combustibles solaires, en combinaison avec le photovoltaïque. Le niveau de maturité de la technologie se situe entre 6 et 7, signifiant que des prototypes ont été testés sur le terrain. En raison de la température élevée du système, la co-électrolyse avec le CO₂ est possible. Le gaz de synthèse (CO+H₂) produit pourrait être utilisé en combinaison avec un procédé Fischer-Tropsch pour obtenir directement des hydrocarbures comme le kérosène synthétique ou le diesel synthétique. Les obstacles freinant la mise sur le marché de la technologie sont principalement la stabilité de la membrane d'oxyde solide et la température de fonctionnement élevée. L'important délai de montée en température de la technologie empêche l'association avec des sources d'électricité renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien. Compte-tenu des prédictions indiquant un déclin du coût des batteries, celles-ci pourraient à l'avenir être utilisées pour fournir une alimentation électrique constante. Un effort de développement des matériaux et de conception de réacteurs est nécessaire à l'introduction de la technologie sur le marché dans les dix prochaines années. La disponibilité de la technologie sur le marché dépendra également de l'intégration de batteries à faible coût, afin de maintenir le système en fonctionnement lorsque l'électricité renouvelable générée est faible, par exemple la nuit ou par temps nuageux et peu venteux.

Le niveau de maturité de la cellule photo-électrochimique ("PEC") est estimée entre 3 et 4. Cela signifie que le prototype du système est développé à petite échelle ou que des sous-systèmes sont développés en laboratoire. Un obstacle clé au développement de la technologies est la corrosion, qui affecte tous les matériaux utilisés jusqu'à présent. Un second obstacle est l'empoisonnement du catalyseur, causé par l'introduction d'impuretés en solution. En effet, il a été démontré que de faibles concentrations d'impuretés peuvent avoir un impact énorme sur l'efficacité des électrodes et que des modifications de la composition et de la morphologie (structure/ caractéristiques structurelles) de l'électrode peuvent diminuer leur efficacité. Dans les dix prochaines années, cette technologie devrait atteindre le stade de prototypage. Un défi sera le développement à grande échelle de la technologie, afin d'assurer le fonctionnement des opérations sur le terrain dans des conditions réelles. Pour cela, des méthodes de traitement à grande échelle sont nécessaires, comme la production en série et les techniques de dépôt en grand volume. Cette technologie sera appliquée dans des systèmes autonomes pour les ménages ou les communautés énergétiques locales. Nous prévoyons une introduction de cette technologie sur le marché autour de 2040.

- *Voie chimique*

Le niveau de maturité des systèmes photocatalytiques à particules ou colloïdaux est compris entre 2 et 3. Cela signifie que l'analyse technique du concept est étudiée et que le concept technologique est partiellement expérimenté et validé à l'échelle du laboratoire. Les premiers obstacles à surmonter pour parvenir à la validation du concept sont le développement des membranes de séparation des gaz, des médiateurs porteurs de charge ioniques, des matériaux assurant la stabilité du processus, l'efficacité du catalyseur et une photosensibilité élevée. Le développement de nanomatériaux auto-assemblés et auto-réparables sera une importante percée pour cette technologie. De nouvelles contraintes seront à surmonter pour développer la technologie à grande échelle. Comme dans le cas de la cellule photo-électrochimique ("PEC"), des méthodes de traitement à grande échelle sont nécessaires, comme la procédure rouleau à rouleau (« roll-to-roll processing ») et les techniques de déposition à haute vitesse. Cette technologie sera appliquée dans des systèmes autonomes pour les ménages ou les

communautés énergétiques locales. Nous prévoyons l'introduction de ces systèmes sur le marché autour de 2050.

- *Voie thermochimique*

Les systèmes thermochimiques solaires de production d'hydrogène sont basés sur des processus en deux étapes à haute température ($>1000^{\circ}\text{C}$) impliquant une décomposition thermique et une réoxydation ultérieure des oxydes métalliques. Ils sont composés d'un système solaire concentré et d'un réacteur pour les réactions thermochimiques, le premier étant disponible à haute maturité (TRL 7-9) et le second (matériaux redox et absorbeur de réacteur) à l'échelle pilote seulement (TRL 5-7). Le niveau de maturité d'ensemble du système se situe donc dans la fourchette 5-7, les principaux problèmes technologiques étant liés aux matériaux adaptés à la haute température, à la durabilité, au rendement en hydrogène et à la réduction des températures et des coûts de production. La feuille de route technologique prévoit, d'ici 2025, l'identification des matériaux appropriés, l'amélioration de la compétitivité et l'atteinte d'une maturité de niveau 7 d'ici 2030. Nous prévoyons un déploiement à grande d'échelle de la technologie vers 2035 et développement commercial avant 2050.

Dans les systèmes biohybrides, une cellule photoélectrochimique fournit des équivalents réducteurs sous la forme, par exemple, de molécules d'hydrogène ou d'électrons, à des bactéries modifiées capables d'utiliser ces derniers pour produire des substances chimiques ciblées par des voies métaboliques. Bien que des dispositifs similaires visant à produire des produits chimiques aient été développés, cette technologie pour la production de combustibles solaires est actuellement déployée à un faible niveau de maturité (2-3). Plusieurs améliorations sont donc nécessaires, notamment en ce qui concerne la conception et la configuration du réacteur, la durabilité des matériaux utilisés dans la section photoélectrochimique, les rendements métaboliques et l'intégration des différents composants dans le système d'ensemble.

Les systèmes à base de microalgues ont déjà atteint une production à l'échelle commerciale pour les composés à valeur ajoutée tels que les nutraceutiques, les cosmétiques, les pigments et les ingrédients alimentaires. Néanmoins, le déploiement des microalgues sur le marché des combustibles solaires est freiné par plusieurs obstacles, notamment d'un point de vue économique en raison des coûts de production élevés. Dans ce contexte, des améliorations techniques supplémentaires sont nécessaires (par exemple dans les systèmes de culture, dans les processus de récolte, dans la production de biocarburants). L'objectif final est d'étudier la configurations des systèmes afin de valoriser les co-produits dans une approche d'économie circulaire ainsi que de coproduire des composés à haute valeur ajoutée avec les biocarburants (par exemple le bioéthanol, le biodiesel, le biogaz/biométhane).

Feuille de route économique

Une feuille de route économique pour les combustibles solaires a été élaborée dans le cadre de l'étude. Cette analyse est un prolongement de la feuille de route technologique qui a identifié les principaux défis, obstacles et opportunités susceptibles de rythmer le développement des technologies de production des combustibles solaires. Dans ce contexte, la feuille de route économique vise à analyser la compétitivité en termes de coûts des différentes voies de production de combustibles solaires. L'objectif était d'étudier la performance des technologies vertes au fil du temps et d'évaluer à quel moment elles pourraient devenir compétitives face aux technologies fossiles. L'analyse a été réalisée par le biais d'un exercice de modélisation économique du coût actualisé de l'énergie ("LCOE"), permettant d'examiner la compétitivité des différentes technologies pour la production de différents combustibles, à savoir l'hydrogène, le méthanol, l'éthanol et le méthane. L'analyse est construite autour de deux scénarios d'investissement : un scénario stable caractérisé par des niveaux d'investissement moyens, et un scénario d'échelle prévoyant d'importants investissements dans les technologies étudiées.

En ce qui concerne les technologies productrices d'hydrogène, l'analyse a démontré que l'électrolyse alcaline ("AE") bénéficie actuellement d'un avantage en termes de coûts parmi les technologies d'hydrogène vert. L'électrolyseur à membrane échangeuse de protons ("PEMEC") est cependant la technologie la plus prometteuse à long-terme, en raison de sa compétitivité en termes de coûts jusqu'en 2100 dans les deux scénarios étudiés. Selon le scénario d'échelle, l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons ("PEMEC") devrait surpasser sa référence fossile, le reformage du méthane à la vapeur ("SMR"), dès 2039. En ce qui concerne la production de méthanol, la technologie d'hydrogénation du CO₂ ("CO₂ hydrogenation") pourrait atteindre la parité des coûts avec sa référence fossile, l'essence automobile, en 2053 selon un scénario stable. Dû à une rapide hausse des prix de l'essence et à d'importants investissements dans la technologie, l'hydrogénation du CO₂ pourrait devenir compétitive sur le marché à partir de 2042. En revanche, les microalgues destinées à la production d'éthanol demeurent plus coûteuses que l'essence jusqu'en 2100, ce qui reflète la faible maturité et l'inefficacité de cette technologie moins développée que d'autres. La méthanisation s'est également avérée prometteuse, devenant compétitive avec le gaz naturel en 2060 selon un scénario d'échelle.

Notre analyse a donc identifié l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (« PEMEC »), l'hydrogénation du CO₂ (CO₂ Hydrogenation) et la méthanisation comme méthodes clés de production des combustibles solaires pouvant devenir compétitives face à leurs références fossiles avant 2060. Cette analyse est complétée par l'étude des perspectives de marché pour les combustibles solaires et leurs technologies de production jusqu'en 2100. L'analyse modélise la demande potentielle de combustibles solaires pour les 80 prochaines années et les investissements requis dans les technologies d'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (« PEMEC »), d'hydrogénation du CO₂ et du traitement de méthane pour répondre à cette future demande.

4.2.2. Perspectives de marché pour les combustibles solaires en 2050 et 2100

L'étude établit des perspectives de marché pour les combustibles solaires dans le monde. Cette analyse nous a permis d'évaluer la contribution potentielle des combustibles solaires dans la décarbonisation de nos systèmes énergétiques en 2050 et 2100. Pour ce faire, nous avons établis une prévision de la consommation finale d'énergie, structurée par région (Afrique, Asie, Australie et Nouvelle-Zélande, Europe, Amérique du Nord et Amérique du Sud), par secteur (industrie, transports, bâtiments et autres) et par type de combustible (biomasse, charbon, e-fuels, électricité, gaz, chaleur, hydrogène et pétrole). L'hydrogène et les « e-fuels », c'est-à-dire les combustibles synthétiques fabriqués à partir d'hydrogène vert et de CO₂, ont été considérés comme des combustibles solaires dans le cadre de cette étude.

L'analyse a pris en compte trois scénarios de développement des systèmes énergétiques mondiaux : un scénario de référence, qui suppose un niveau d'effort de base, correspondant aux efforts actuels mis en œuvre pour la décarbonisation ; un scénario de 2°C, dans lequel des efforts sont faits pour limiter l'augmentation de la température mondiale jusqu'en 2100, par rapport aux niveaux préindustriels, de 2°C maximum, et un scénario de 1,5°C.

Dans le scénario 2°C, les combustibles solaires devraient couvrir 3,8 % de nos besoins énergétiques mondiaux en 2050, et 5,8 % en 2100. Prenant en compte les différents secteurs concernés, pour le scénario 2°C, les combustibles solaires ne couvriraient que 0,8 % des besoins énergétiques de l'industrie en 2050 et à 1,5 % en 2100. Dans le secteur des transports, notre analyse prévoit que les combustibles représenteront 11 % de la demande énergétique en 2050, avant d'atteindre 15,2 % en 2100. Enfin, concernant les bâtiments, les combustibles solaires devraient représenter 3,1 % de la consommation finale en 2050 et 4,7 % en 2100.

Les informations recueillies auprès d'experts et notre travail de recherche ont révélé un certain nombre de facteurs qui pourraient avoir un impact sur l'adoption des combustibles solaires dans le monde :

- Le coût des combustibles solaires (principalement déterminé par le prix de l'électricité solaire) par rapport aux coûts des combustibles fossiles comparables,
- Le coût d'adaptation des systèmes d'utilisation finale des combustibles solaires, comme le remplacement du charbon par l'hydrogène pour la production d'acier,
- les coûts d'infrastructure,
- la demande de produits industriels, de véhicules et de services de transport neutres en carbone, et de technologies de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments,
- Des réglementations et des politiques de soutien telles que celles qui mettent en œuvre des mécanismes de tarification du carbone.

L'industrie, en particulier, pourrait potentiellement devenir l'un des premiers secteurs à adopter les technologies de combustibles solaires dans certaines applications. En effet, l'industrie démontre un intérêt croissant pour les systèmes de capture et de stockage du carbone. De ce fait, le CO₂ pourrait devenir plus facilement disponible et servir d'intrant à la production de combustible solaire. Ces combustibles solaires pourraient être produits et utilisés sur les lieux de production, afin d'alimenter ces mêmes processus industriels émetteurs de CO₂, fermant ainsi la boucle du carbone. De tels programmes, soutenus par des systèmes d'incitations appropriées, pourraient encourager les entreprises à investir dans des technologies en phase de démarrage.

L'analyse fournit des perspectives détaillées pour l'Afrique en particulier, un continent pour lequel une contribution légèrement inférieure des combustibles solaires est attendue. Cela s'explique notamment par le coût élevé du capital en Afrique ainsi que par les coûts élevés de l'utilisation des combustibles solaires dans leurs applications finales. Cela est particulièrement vrai pour l'hydrogène, même si celui-ci devrait atteindre la maturité commerciale en Afrique et dans le monde plus tôt que les autres combustibles solaires. Néanmoins, l'Afrique est caractérisée par une importante irradiance solaire et un manque d'infrastructure énergétique dans de nombreuses régions, deux éléments faisant du continent une cible idéale pour l'investissement dans les combustibles solaires. Le développement de chaînes locales d'approvisionnement en combustibles solaires pourrait susciter une plus grande demande locale et contribuer à accroître la contribution des combustibles solaires aux besoins énergétiques africains, à un rythme plus rapide que prévu.

4.3. Développement du Forum International sur les combustibles solaires (International Solar Fuel Forum)

Le projet a développé un réseau de communication visant à stimuler l'échange d'information sur les combustibles solaires et à soutenir le travail de recherche de l'étude. Le Forum International sur les combustibles solaires (International Solar Fuel Forum) créé à cette fin a rassemblé des experts scientifiques, les pouvoirs publics, des acteurs de la société civile et industriels du monde entier pour discuter de la recherche et des investissements dans le domaine des combustibles solaires.

La stratégie d'engagement et de communication créée se compose de nombreux éléments qui reflètent la portée et les spécifications du projet. Elle détaille les différents outils, méthodes et actions mis en œuvre pour construire et activer avec succès un réseau de communication dédié aux combustibles solaires, tout en tenant compte des facteurs contextuels.

La mise en place du réseau de communication a nécessité trois éléments fondamentaux. Tout d'abord, il était primordial de s'assurer que le réseau disposait des mesures appropriées pour le respect de la protection des données. De plus, la politique de confidentialité créée pour le projet et la stratégie d'engagement avec les parties prenantes ont garanti la plus grande confidentialité dans l'utilisation des données collectées auprès de ces derniers. Un plan d'action détaillé en matière de communication a été élaboré pour identifier les parties prenantes concernées et les encourager à participer au projet. Cela a facilité la création du réseau et a encouragé les multiplicateurs à partager les informations et résultats du projet au sein de leurs propres réseaux. Enfin, le développement d'une identité visuelle propre au projet a permis d'accroître sa visibilité et sa reconnaissance auprès des parties prenantes.

Deux outils clés se sont ajoutés au développement du réseau : la solution technique Webex comme plate-forme de discussion et la page d'accueil du projet. La page d'accueil EY était le point central pour les inscriptions au projet, reprenant des informations clés sur l'étude ainsi que la politique de confidentialité et de protection des données du projet. En outre, les plateformes techniques Webex Meetings et Webex Teams ont accueilli le Forum international sur les combustibles solaires et ses vidéoconférences. Webex a fourni un environnement convivial et accessible pour générer des discussions actives avec les parties prenantes au projet.

Certains facteurs contextuels ont joué un rôle dans la mise en place du réseau de communication. L'épidémie mondiale de la COVID-19 et les mesures nationales de confinement ont modifié l'environnement de communication du projet. La majorité des événements ont adopté une approche virtuelle, tout comme les campagnes de communication, ce qui a entraîné un surcroissement de l'espace digital. En outre, le projet et ses vidéoconférences ont accueilli des parties prenantes du monde entier, un élément qui a été pris en compte en adaptant la programmation à différents fuseaux horaires.

La participation des parties prenantes au réseau de communication s'est faite par le biais de quatre activités principales. Le réseau de courrier électronique a été le principal point de contact avec les différents acteurs ciblés, dans le but de diffuser des informations sur le projet et les invitations aux vidéoconférences. Le forum Webex a été le principal espace de discussion et a servi de source d'information sur les activités du projet. Le sondage en ligne a permis de recueillir les commentaires des experts sur la méthodologie et les données du projet. Enfin, les vidéoconférences ont permis de diffuser les résultats clés du projet et d'engager des discussions avec les parties prenantes.

Le réseau de communication sur les combustibles solaires intitulé le « International Solar Fuel Forum » est actif sur Webex Teams et compte 70 inscriptions.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Diese von der Europäischen Kommission finanzierte Studie, umfasst eine technoökonomische Analyse der globalen solaren Wertschöpfungsketten und deren Produktionswege für eine nachhaltige Umsetzung. Die Studie unterteilt sich in vier Hauptaufgaben: eine technoökonomische Analyse der weltweiten Wertschöpfungsketten für Solarkraftstoffe; einen Fahrplan für die technologische Entwicklung von Solarkraftstoffen für 2030 und 2050 und einen wirtschaftlichen Fahrplan für 2100 sowie einen Marktausblick, der das volle Potenzial von Solarkraftstoffen für 2050 und 2100 abbildet; das Internationale Forum für Solarkraftstoffe; und die Organisation einer internationalen Konferenz über Solarkraftstoffe. Die Studie zielt darauf ab, die wichtigsten technologischen Engpässe zu identifizieren, die überwunden werden müssen, um die industrielle Produktion von Solarkraftstoffen in großem Maßstab zu ermöglichen. Auf dieser Grundlage, wird die Kostenwettbewerbsfähigkeit einer Reihe von Solarkraftstofftechnologien analysiert, gemeinsam mit dessen Potenzial für Markteinführungszeit, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Mit der Prognose der möglichen Nachfrage von Solarkraftstoffen bis 2100, gibt die Studie einen Ausblick darauf, welche Rolle Solarkraftstoffe in unserem Energiesystemen der Zukunft spielen könnten. Die nötigen Investitionen, damit Kapazitäten aufgebaut werden und die Nachfrage gedeckt, werden analysiert. Weiters bietet diese Studie eine Analyse der externen Faktoren, welche die Entwicklung und den Einsatz von Solarkraftstoffen weltweit beeinflussen können.

6. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE DER STUDIE

Solarkraftstoffe nutzen das Sonnenlicht als Energiequelle und stellen ein großes Potenzial dar damit der weltweite zukünftige Energiebedarf gedeckt wird.. Wie in Abbildung 1 dargestellt, resultieren Solarkraftstoffe aus der Umwandlung von Sonnenlicht in Kraftstoffe wie Methanol oder Wasserstoff. Sie können auf einfache Art und Weise gespeichert werden, um auf den fluktuierenden Energiebedarf zu reagieren und können unterschiedliche Anwendung finden, im Transportsektor, in der Energienachfrage von Gebäuden und dem Industriesektor. Solarkraftstoffe können durch verschiedene technologische Produktionswege hergestellt werden, nämlich durch elektrochemische, chemische, thermochemische und biochemische Prozesse. Der Markt für Solarkraftstoffe befindet sich jedoch noch in einer frühen Entwicklungsphase. Um eine Massenproduktion von Solarkraftstoffen zu erreichen, ist ein koordinierter Ansatz erforderlich mit Experten aus unterschiedlichen Bereichen und integriertem Wissen über technologische Entwicklungen, industrielle Umsetzung und Marktakzeptanz.

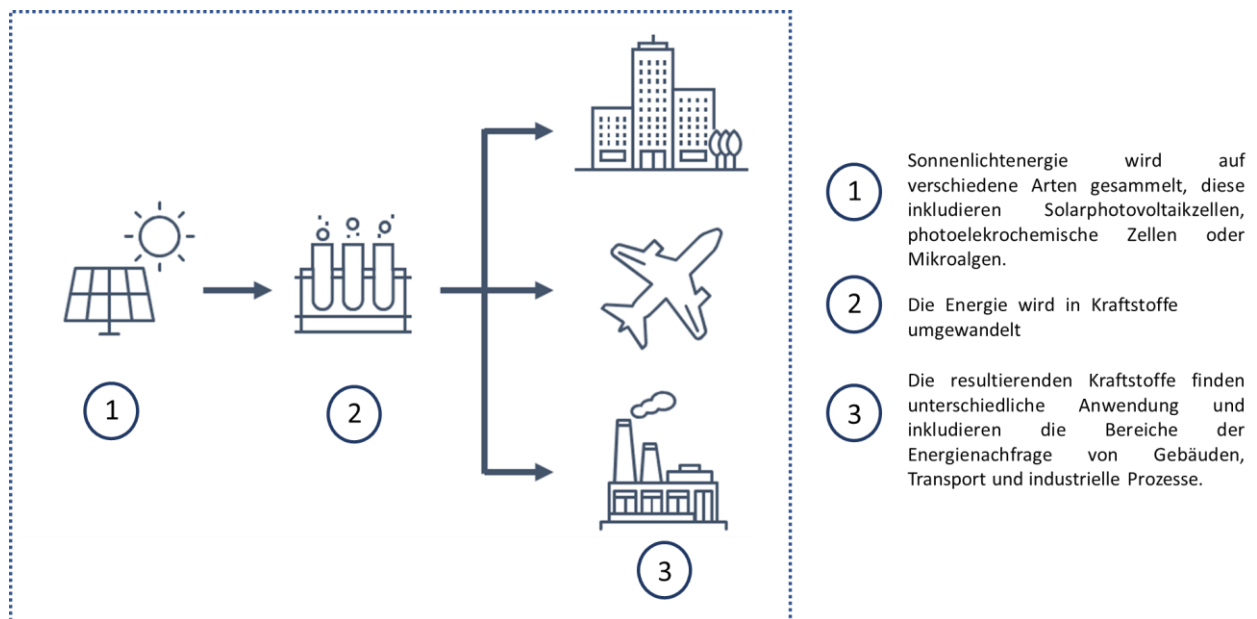


Abbildung 1 – Wertschöpfungskette von Solarkraftstoffen

Aufgrund von diesem Ausblick, hat sich die Europäische Union auf der UN Klimakonferenz in Paris 2015 (kurz COP21), der Mission Innovation angeschlossen, welche das Potenzial von Solarkraftstoffen untersucht, die durch - verschiedene technologische Ansätze und Produktionswege hergestellt werden. Dieser Schritt war Teil des übergreifenden Versprechens der Europäischen Union, zur Dekarbonisierung der Gesellschaft und Wirtschaft und der Verpflichtung die weltweite Führungsrolle für erneuerbare Technologien einzunehmen. Weil Solarkraftstoffe als potenzieller „Game Changer“ angesehen werden, hat die Europäische Kommission unter dem gemeinsamen Vorsitz der Converting Sunlight Innovation Challenge eine qualitative und quantitative Analyse vorgenommen zu den Wertschöpfungsketten von Solarkraftstoffen und der Entwicklung eines zukunftsweisenden, technoökonomischen und internationalen Fahrplans.

Das ist der Kontext für diese von der Europäischen Kommission finanzierte Studie zum Thema "Forschung und Investition von Solarkraftstoffen: Definition und Entwicklung der globalen Wertschöpfungskette für Solarkraftstoffe: technoökonomische Analyse und Fahrpläne für eine nachhaltige Umsetzung", die von einem Konsortium aus EY, IMEC, RINA und CEPS durchgeführt wurde.

6.1. Definition der Wertschöpfungsketten von Solarkraftstoffen

Diese Studie hat die wichtigsten Wertschöpfungsketten für Solarkraftstoffe unter den folgenden vier spezifischen Produktionswegen analysiert: chemisch, elektrochemisch,

thermochemisch und biochemisch. Für jeden technologischen Produktionsweg wurden die wichtigsten technologischen Komponenten und ihre Brennstoffherstellungsprozesse quantitativ analysiert;- dabei wurden die verschiedenen Rohstoffe und Ressourcen für jede Technologie dargestellt um einen bestimmten Solarkraftstoffe zu produzieren. Diese Kategorisierung wurde für die folgenden Produktionswege und Technologien durchgeführt:

- Elektrochemischer Produktionsweg: Alkalische Elektrolyse („AEL“), Protonen-Austausch Membran Electrolyseur („PEMEL“), Photoelektrochemische Zellen („PEC“)
- Thermochemischer Produktionsweg: Festoxid-Elektrolyseurzelle („SOEC“)
- Chemischer Produktionsweg: Photokatalytisches Partikel- oder kolloidal System
- Biochemischer Produktionsweg: Biohybride-Systeme („Bionic Leaf“), Mikroalgen

Das Ziel dieser qualitativen Analyse und Auswahl war es, sich auf die wichtigsten Wertschöpfungsketten auf Basis von ihrem Potenzials für technologische und wirtschaftliche Verbesserungen zu konzentrieren. Dies bildete die Grundlage für die wirtschaftliche und quantitative Analyse der Wertschöpfungsketten für die Technologien. Die quantitative Analyse umfasste zusätzliche vielversprechende Technologien, die im Rahmen der Hydrierungs- und Methanisierungswege behandelt wurden. Die Analyse der Wertschöpfungskette wurde auf der Grundlage einer ökonomischen Modellierungsübung mit Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Energy (LCOE)) durchgeführt, bei der die LCOE-Variablen in eine Reihe von Komponenten der Wertschöpfungskette zerlegt wurden, wie Investitionen („CAPEX“), Gemeinkosten und Wartung, Produktionskosten einschließlich Personalkosten und Energieaufwandskosten sowie die Berücksichtigung der Verwertung von Nebenprodukten. Die Analyse wurde für das Jahr 2020 und pro Brennstoff durchgeführt, zum Beispiel wurden alle relevanten Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff untersucht, dadurch konnte ein Vergleich von grünen Solartechnologien mit jenen auf fossiler Basis stattfinden.

Die Analyse ergab, dass die Produktionskosten, die primär aus Energieaufwandskosten bestehen, die treibenden Kraft der Stromgestehungskosten (LCOE) in den meisten Produktionswegen ist, nämlich in Elektrochemie, Thermochemie, Hydrierung und Methanisierung. Der Energieaufwand für die elektrochemischen und thermochemischen Produktionswege, wird durch solare Photovoltaikanlagen gewonnen, dessen Kosten hauptsächlich Investitionskosten (CAPEX) beinhalten. Die Investitionskosten (CAPEX) für solare Photovoltaikanlagen sind aufgrund dessen in den Kosten für grünen Wasserstoff enthalten, welcher über die elektrochemischen und thermochemischen Produktionswege erzeugt wird und letztendlich bestimmen diese einen erheblichen Teil der Kosten für grünen Wasserstoff, nämlich bis zu 60 Prozent. Die Kosten für grünen Wasserstoff machen 87 Prozent und 93 Prozent des LCOE für Kraftstoffe aus, produziert durch die Hydrierungs- und Methanisierungswege in 2020. Dies bedeutet, dass die Investitionskosten (CAPEX) für solare Photovoltaikanlagen, indirekt für mehr als die Hälfte der Stromgestehungskosten (LCOE) des erzeugten Solarkraftstoffes verantwortlich sind, welche durch die die Hydrierungs- und Methanisierungswege produziert werden.

Investitionskosten (CAPEX) ist die kostenintensivste Komponente für Festoxid-Elektrolyseurzelle (SOEC) und vor allem für Mikroalgen; beide Technologien sind durch einen niedrigen Reifegrad charakterisiert. In diesem Zusammenhang sind Mikroalgen auch mit hohen Gemeinkosten und Wartungskosten verbunden, welche den experimentellen Charakter der Technologie widerspiegeln.

Eine deutliche Beobachtung, die durch die Wertschöpfungskette und der LCOE-Analyse gemacht wurde, ist der Kostenvorteil, von dem Technologien für fossile Brennstoffe, einschließlich der Methan-Dampfreformierung und des Methanolprozesses, im Vergleich zu umweltfreundlichen Produktionsmethoden. Eine andere wichtige Beobachtung ist, dass

die momentanen Kosten für Solarkraftstoffe vor allem von den hohen Investitionskosten für solare Photovoltaikanlagen abhängen, und dies trotz erheblicher Kostensenkungen im letzten Jahrzehnt. Deshalb ist das Erreichen von kostengünstigen solaren Photovoltaikanlagen ein Hauptziel um solare Brennstoffe wettbewerbsfähig zu machen.

Diese Analyse liefert daher eine Momentaufnahme des aktuellen Zustands der Wertschöpfungsketten der untersuchten Technologien, indem die diversen Komponenten des Stromgestehungskosten (LCOE) dargestellt werden. Das LCOE-Modell ermöglicht auch eine vorausschauende Zeitreihenanalyse bis 2100, bei der die Leistung der Technologien im Zeitverlauf geschätzt und eine Bewertung stattfindet um festzustellen, ab welchem Zeitpunkt die grünen Technologien die Kostenwettbewerbsfähigkeit von fossilen Brennstoffen überholen. Diese Analyse wird im folgenden Abschnitt dieser Studie dargestellt, welche einen technologischen Fahrplan (für 2030 und 2060) und einen wirtschaftlichen Fahrplan (bis 2100) für alle untersuchten Technologien erstellt.

6.2. Fahrplan für Solarkraftstoffe und Marktausblick

6.2.1. Technologie- und Wirtschaftsfahrplan für Solarkraftstoffe

Die Studie stellt einen technologischen Fahrplan für Solarkraftstofftechnologien für 2030 und 2050 sowie einen wirtschaftlichen Fahrplan für Solarkraftstoffe bis 2100 dar. Der technologische Fahrplan für 2030 und 2050 zielte darauf ab, die wichtigsten technologischen Herausforderungen und Engpässe zu bewerten, die überwunden werden müssen damit die Produktion von solaren Brennstoffen eine kommerzielle Anwendung findet.

Ausgehend von der Identifizierung von Schlüsseltechnologien auf chemischem, elektrochemischem, thermochemischem und biochemischem Weg bestimmt die Analyse, den aktuellen Technikbereitschaft (engl. Technology Readiness Level (TRL)) der Komponenten aller Technologien. Nach diesem Schritt konzentriert sich die Studie darauf, die wichtigsten Herausforderungen in Verbindung mit jeder Komponente und dem Gesamtsystem zu identifizieren: diese Phase umfasst nach Möglichkeit eine SWOT-Analyse und eine Patentanalyse. Die wichtigsten Ergebnisse des technologischen Fahrplans zeigen die geschätzten Technikbereitschaftsfortschritte in den Jahren 2030 und 2050, einschließlich der wichtigsten Maßnahmen die durchgeführt werden müssen damit die Technologien kommerzielle Anwendung finden.

Der wirtschaftliche Fahrplan, der auf dem technologischen Fahrplan aufbaut, berücksichtigt die Ergebnisse technologischer Verbesserungen bei den Solarkraftstoffwegen, indem der erwartete LCOE für jede Technologie modelliert wird. Es wurden zwei Szenarien für die Entwicklung von Solarkraftstoffen betrachtet: das erste modelliert relativ stabile Investitionen in Solarkraftstoffwege, während das zweite einen erheblichen Investitionsschub vorsieht, wodurch die Markteinführungszeit für Solarkraftstoffe verkürzt wird. Das letztere Szenario, das in dieser Studie als „Maßstab“ bezeichnet wurde, sieht erhebliche Investitionen in Solarkraftstofftechnologien vor, und das noch bevor Solarkraftstoffe kostengünstiger als fossile Brennstoffe werden.

Technologischer Fahrplan

- *Elektrochemischer Produktionsweg*

Die Protonen-Austausch Membran Electrolyseur („PEMEL“)Technologie wird im elektrochemischen Produktionsweg von Solarkraftstoffen in Kombination mit Photovoltaik verwendet. Es wurde festgestellt, dass die Technologiebereitschaft von PEMEL nach dem Stand der Technik zwischen 7 und 8 liegt. Die Vorteile von PEMEL sind die schnelle Reaktionszeit, deshalb ist es attraktiv mit intermittierenden erneuerbaren Stromquellen und der hohen Reinheit von Produktgasen zu arbeiten. Diese Technologie hat das Potenzial, innerhalb von 5 Jahren die vollständiges Marktpotenzial zu erreichen. Die Hochskalierung auf die GW-Produktion erfordert eine starke Reduktion oder Substitution

von Edelmetall-katalysatoren wie PGM. Es gibt zwei Möglichkeiten, um diesen Engpass zu beheben. Eine ist die Abschwächung von der Protonenaustauschmembran zu den Hydroxylaustauschmembranen und Verfahren findet in alkalischen anstelle von sauren Elektrolyten statt. Dies verringert den Entwicklungsdruck auf das Elektroden- / Katalysatormaterial, da häufig vorkommende Metalle verwendet werden könnten. Weiteres verschiebt es den Entwicklungsaufwand in Richtung der Membran, weil Hydroxylaustauschmembranen, nicht mit dem gleichen technologischen Bereitschaftsgrad wie Protonenaustauschmembranen kommerziell erhältlich sind. Eine andere Möglichkeit um die Entwicklung PEMEL -Technologie zu beschleunigen, wäre die starke Reduktion von PGM-Katalysatoren durch neuartige Materialtechnologien wie Core-Shell-Nanopartikel oder neuartige Dünnschicht-Prozesstechnologien, bei denen nur ein Bruchteil der Menge der Edelmetallkatalysatoren benötigt wird.

Die SOEC-Technologie wird im elektrochemischen Produktionsweg von Solarkraftstoffen in Kombination mit Photovoltaik eingesetzt. Der Stand der Technikbereitschaft der SOEC-Technologie im elektrochemischen Produktionsweg von Solarkraftstoffen liegt zwischen 6 und 7. Dies bedeutet, dass Prototypen vor Ort und unter Einhaltung der vorgesehenen Arbeitsbedingungen getestet wurden. Aufgrund der hohen Systemtemperatur ist eine Co-Elektrolyse mit CO₂ möglich. Als Produkt könnte Synthesegas (CO + H₂) in Kombination mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren in höhere Kohlenwasserstoffe, wie synthetisches Kerosin oder synthetischer Diesel konvertiert werden. Die Engpässe bei der Marktumsetzung sind hauptsächlich die Stabilität der Festoxidmembran und die hohe Betriebstemperatur. Eine lange Hochlaufzeit aufgrund der hohen Betriebstemperatur verhindert die direkte Kopplung mit hoch intermittierenden erneuerbaren Stromquellen, wie Sonne und Wind. Sollten die Batteriekosten in Zukunft weiter sinken, können kostengünstige Batterien verwendet werden, um eine konstante Stromversorgung zu puffern und bereitzustellen. Materialentwicklung und Reaktordesign sind erforderlich, um diese Technologie innerhalb der nächsten 10 Jahre für den Markt verfügbar zu machen. Die Marktverfügbarkeit hängt auch von der Integration kostengünstiger Batterien ab, damit das System am Laufen gehalten wird mit einem geringen Anteil an erneuerbaren Strom, welcher hauptsächlich Nachts generiert wird aus Wolken oder Wind.

Die Entwicklung der PEC-Technologie im elektrochemischen Pfad von Solarkraftstoffen wird auf 3 bis 4 festgelegt. Das bedeutet, dass ein kleiner Prototyp des Systems oder der Teilsysteme im Labor entwickelt wird. Die Engpässe / kritischen Probleme, die überwunden werden müssen, um ein stabiles System und Operationen für Prototypen zu erzeugen ist Korrosion, welche bei allen Materialien über lange Zeiträume auftreten, nämlich Katalysatorvergiftung. Dies wird durch das Einbringen von Lösungsverunreinigungen verursacht und es hat sich gezeigt, dass geringe Konzentrationen von Verunreinigungen einen großen Einfluss auf die Effizienz der Elektrode haben und Änderungen der Zusammensetzung und Morphologie (Struktur/ Strukturmerkmale) der Elektrode, die Effizienz verringern können. In den nächsten 10 Jahren wird diese Technologie erfolgreich die Prototypenentwicklung beweisen. Darauf folgt die Herausforderung der Hochskalierung der Technologie und Operationen vor Ort unter realen Bedingungen müssen geprüft werden. Dafür sind großflächige Verarbeitungsverfahren wie die Rolle-zu-Rolle-Produktion und großvolumige Abscheidungstechniken erforderlich. Diese Technologie wird in eigenständigen Systemen für Haushalte oder lokalen Energiegemeinschaften eingesetzt. Wir erwarten eine Markteinführung dieser Technologie in den 2040er Jahren.

- *Chemischer Produktionsweg*

Der Stand der Technikbereitschaft der photokatalytischen Partikel- oder kolloidalen Systemtechnologie liegt zwischen 2 und 3. Dies bedeutet, dass die technische Analyse des Konzepts untersucht wird und teilweise wird das technologische Konzept im Labor experimentiert und validiert wird. Die ersten Engpässe/kritischen Probleme, die bei einem Wirksamkeitsnachweis zu überwinden sind, ist die Entwicklung von Gastrennmembranen, Mediatoren für ionische Ladungsträger und Materialien, die Prozessstabilität, hohe Katalysatoreffizienz und hohe Lichtempfindlichkeit bieten. Ein Durchbruch für diese

Technologie wird die Entwicklung selbstorganisierter und selbstreparierender Nanomaterialien sein. Nachdem die Prototypenentwicklung stattgefunden hat, gilt es die Herausforderung der Hochskalierung anzugehen. Es gelten die gleichen Einschränkungen für die Materialien wie bei der Herausforderung der PEC-Hochskalierung. Großtechnische Verarbeitungsverfahren wie Rolle-zu-Rolle-Produktion und großvolumige Abscheidungstechniken sind dafür erforderlich. Diese Technologie wird in eigenständigen Systemen für Haushalte oder lokale Energiegemeinschaften angewandt. Wir erwarten die Markteinführung dieser Systeme in den 2050er Jahren.

- *Thermochemischer Produktionsweg*

Solarthermochemische Wasserstoffproduktionssysteme basieren auf zweistufigen Prozessen bei hohen Temperaturen ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), die eine thermische Zersetzung und anschließende Reoxidation von Metalloxiden beinhalten. Sie bestehen aus einem konzentrierten Solarsystem und einem Reaktor für thermochemische Reaktionen, wobei ersterer bei hoher Technologiereife (TRL 7-9) und letzterer (Redoxmaterialien und Reaktorabsorber) nur im Pilotmaßstab (TRL 5-7) verfügbar sind. Der Gesamttechnologiereifegrad des Systems ergibt sich daher im Bereich von 5 bis 7, wobei die wichtigsten technologischen Probleme sich auf Materialien beziehen, die für hohe Temperaturen, Haltbarkeit und Wasserstoffgewinn geeignet sind, sowie auf die Reduzierung von Temperaturen und Produktionskosten. Der entwickelte technologische Fahrplan sieht bis 2025 die Identifizierung geeigneter Materialien vor, und erreicht damit eine technische Demonstration bei TRL 6. Eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und weitere Prototypentests bei TRL 7 sind bis 2030 vorgesehen, und die vollständige Demonstration in Feld sollte bis 2035. Der kommerzielle Einsatz wird in den 2050 Jahren erwartet.

- *Biochemischer Produktionsweg*

In Biohybridsystemen liefert eine photoelektrochemische Zelle reduzierende Äquivalente in Form von z.B. Wasserstoffmoleküle oder Elektronen mit technisch modifizierten Bakterien, welche verwendet werden können um gezielt Chemikalien über Stoffwechselprozesse zu produzieren. Obwohl ähnliche Vorrichtungen mit dem Ziel produziert wurden, wie z.B. die Entwicklung von Feinchemikalien, wird diese Technologie für die Herstellung von Solarkraftstoffen derzeit bei sehr niedrigen Technologiereifegraden (TRL 2-3) eingesetzt. Daher verschiedene Verbesserungen nötig, insbesondere in Bezug auf Reaktordesign und -konfiguration, Haltbarkeit der im photoelektrochemischen Bereich verwendeten Materialien und Stoffwechseleffizienz und die Integration der verschiedenen Komponenten im Gesamtsystem.

Obwohl Systeme auf Mikroalgenbasis bereits die Produktion auf kommerzieller Basis erreicht haben, wie die Wertschöpfung von Nahrungsergänzungsmitteln, Kosmetika, Pigmenten und Lebensmittelzutaten, ist eine effektive Markteinführung von Solarkraftstoffen auf Mikroalgenbasis immer noch mit mehreren Herausforderungen verbunden, insbesondere im wirtschaftlichen Sinne aufgrund der hohen Produktionskosten. In diesem Zusammenhang sind weitere technische Verbesserungen erforderlich (z. B. bei den Anbausystemen, bei den Ernteprozessen, bei der Herstellung von Biokraftstoffen) mit dem konkreten Ziel Systemkonfigurationen zu untersuchen, die parallele Entwicklungen in einer Kreislaufwirtschaft ermöglichen, sowie Nebenprodukte hochwertiger Verbindungen zusammen mit Biokraftstoffen erzeugen. (z. B. Bioethanol, Biodiesel, Biogas/Biomethan).

Wirtschaftlicher Fahrplan

Ein wirtschaftlicher Fahrplan für Solarkraftstoffe wurde, als Fortsetzung des Technologen Fahrplans entwickelt, welcher die wichtigsten Herausforderungen, Engpässe und Chancen analysiert damit die Entwicklung der Solarkraftstofftechnologien in der Zukunft beschleunigt werden kann.

In diesem Kontext zielte der wirtschaftliche Fahrplan darauf ab, die wirtschaftlichste und kostengünstigste Möglichkeit der verschiedenen Produktionswege von Solarkraftstoffen zu analysieren. Ziel war es, die Kostenleistung der Technologien im Zeitverlauf zu untersuchen und zu festzustellen ab welchem Zeitpunkt Konkurrenzfähigkeit mit fossilen Brennstoffen möglich ist. Die Analyse zum wirtschaftlichen Fahrplan wurde durch eine Zeitreihen-LCOE-Analyse bis 2100 durchgeführt, wobei die Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Technologien bei der Herstellung verschiedener Kraftstoffe, nämlich Wasserstoff, Methanol, Ethanol und Methan, untersucht wurde. Die Analyse befasste sich mit den Entwicklungen der Technologien unter zwei Investitionsszenarien: einem stabilen Szenario, das durch normale Investitionsniveaus gekennzeichnet ist, und einem umfangreichen Szenario, das einen Investitionsschub für die untersuchten Technologien vorsieht.

Mit Blick auf die Wasserstofftechnologien ergab die Analyse, dass Alkalische Elektrolyse (AEL), derzeit von einem Kostenvorteil unter den grünen Wasserstofftechnologien profitiert, PEMEL jedoch aufgrund seiner zeitlichen Wettbewerbsfähigkeit in beiden Szenarien als die vielversprechendste Technologie gilt. Es wird erwartet, dass PEMEL bereits 2039 in einem umfangreichen Szenario seinen fossilen Benchmark der Methan-Dampfreformierung übertrifft. In Bezug auf die Methanolproduktion könnte die CO₂-Hydrierung im Jahr 2053 in einem stabilen Szenario die Kostenparität mit ihrem fossilen Benchmark Motorbenzin erreichen. Mit steigenden Benzinpreisen könnte die CO₂-Hydrierung mit einem Investitionsschub ab 2042 marktfähig werden. Demgegenüber stehen Mikroalgen für die Ethanolproduktion deren Leistbarkeit in Bezug auf Motorbenzin bis 2100 geringer sein wird, dies widerspiegelt die niedrige Reife und relative Ineffizienz der Technologie. Methanisierung ist auch eine vielversprechende Technologie, die im Rahmen eines umfangreichen Szenarios voraussichtlich 2060 die Kostenparität mit Erdgas erreichen wird.

Unsere Analyseidentifizierte PEMEL, CO₂-Hydrierung und Methanisierung als Schlüsseltechnologien für Solarkraftstoffe, welche die Wettbewerbsfähigkeit mit fossilen Benchmarks, bis voraussichtlich 2060 erreichen werden. Diese Analyse wird durch den Marktausblick für Solarkraftstoffe und Solarkraftstofftechnologien bis 2100 ergänzt. Die Analyse zeigt die zukünftige potenzielle Nachfrage nach Solarkraftstoffen und erfordert Investitionen in die PEMEL, CO₂-Hydrierungs- und Methanisierungstechnologien, welche zur Deckung dieser prognostizierten Nachfrage erforderlich sind.

6.2.2. Marktausblick für Solarkraftstoffe für 2050 und 2100

Es wurde ein Marktausblick für Solarkraftstoffe entwickelt, um den potenziellen Beitrag von Solarkraftstoffen zu weltweiten Dekarbonisierung der Energiesysteme in den Jahren 2050 und 2100 zu bewerten. Die Analyse umfasste eine Prognose des Endenergieverbrauchs nach Regionen (Afrika, Asien, Australien und Neuseeland, Europa, Nordamerika und Südamerika) nach Sektoren (Industrie, Verkehr, Gebäude, und andere) und nach Brennstofftypen (Biomasse, Kohle, elektronische Brennstoffe, Strom, Gas, Wärme, Wasserstoff und Öl). Sowohl Wasserstoff als auch elektronische Brennstoffe, das sind synthetische Brennstoffe die aus grünem Wasserstoff und CO₂ hergestellt wurden, wurden für die Zwecke der Analyse als Solarkraftstoffe angesehen. Die Analyse berücksichtigte drei Szenarien für die Entwicklung weltweiter Energiesysteme: ein Referenzszenario unter der Annahme einer bestimmten Grundanstrengung zur Dekarbonisierung entsprechend der aktuellen Bemühungen; ein 2° Celsius Szenario unter welchem Anstrengungen unternommen werden, um die globale Temperatur bis 2100 gegenüber dem vorindustriellen Niveau auf 2° Celsius zu halten, und ein 1,5 ° Celsius Szenario.

Unter dem 2° Celsius Szenario wird erwartet, dass Solarkraftstoffe 3,8 Prozent unseres weltweiten Energiebedarfs in 2050 ausmachen und in 2100 5,8 Prozent unseres weltweiten Energiebedarfs. Betrachtet man unter dem 2° Celsius Szenario einzelne Sektoren dann wird der Beitrag von Solarkraftstoffen nur 0,8 Prozent des Energiebedarfs in der Industrie im Jahr 2050 und 1,5 Prozent des Energiebedarfs im Jahr 2100

ausmachen. Im Transportsektor erwarten unsere Analysen, dass Solarkraftstoffe im Jahr 2050, 11 Prozent und bis 2100 15,2 Prozent des Energiebedarfs ausmachen. Schließlich können Solarkraftstoffe in Gebäudereich eingesetzt werden, wo sie voraussichtlich in 2050 3,1 Prozent und 2100 4,7 Prozent zum Endbedarf beitragen.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Workshops mit Interessensvertretern und die Literaturrecherche, zeigen eine Reihe von Faktoren auf, die sich auf die weltweite Zunahme von Solarkraftstoffen auswirken könnten, darunter:

- Kosten für Solarkraftstoffe, die primär vom Preis für Solarstrom angetrieben werden versus zu den Kosten vergleichbarer fossiler Brennstoffe;
- Kosten für die Anpassung von Systemen der Endverbraucher an Solarkraftstoffe, wie zum Beispiel den Wechsel von Kohle zu Wasserstoff bei der Stahlherstellung;
- Infrastrukturkosten;
- Nachfrage nach klimaneutralen Industrieprodukten, Fahrzeugen und Transportdienstleistungen und Heiz- und Kühltechnologien von Gebäuden, und
- Unterstützende Vorschriften und Richtlinien wie die Implementierung von CO₂-Preismechanismen.

Insbesondere die Industrie könnte für bestimmte Produktionen Erstanwender von Solarkraftstofftechnologien werden. Da die Industrie zunehmend über Systeme zur Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff nachdenkt, wird CO₂ möglicherweise leichter verfügbar sein und könnte als Input für die Erzeugung von Solarkraftstoffen dienen. Diese Solarkraftstoffe könnten lokal hergestellt und verwendet werden um dieselben CO₂-emittierenden Industrieprozesse anzutreiben, dadurch würde sich der Kohlenstoffkreislauf schließen. Solche Systeme im Zusammenhang mit den richtigen Anreizen, könnten sich für die Industrie als attraktiv erweisen und sie dazu veranlassen, in Technologien im Frühstadium zu investieren.

Diese Studie analysiert insbesondere für Afrika einen detaillierten Ausblick, für den ein etwas geringerer Beitrag von Solarkraftstoffen erwartet wird. Einige der Gründe hierfür sind hohe Kapitalkosten in Afrika sowie hohe Kosten für die Verwendung von Solarkraftstoffen in Endanwendungen. Dies gilt insbesondere für Wasserstoff – auch wenn erwartet wird, dass Wasserstoff früher als andere Solarkraftstoffe zur Marktreife gelangt, bleiben die Kosten für Unternehmen, Entwickler sowie Fahrzeugbesitzer und -betreiber sehr hoch, sollten sie ihre industriellen Prozesse, Gebäude und Fahrzeuge an den Betrieb von Wasserstoff anpassen. Der Mangel von Infrastrukturen in vielen Teilen Afrikas in Verbindung mit dem hohen Sonneneinstrahlungsfaktor, macht den Kontinent jedoch zu einem idealen Ziel für Investitionen in Solarkraftstoffe. Die Entwicklung lokaler Lieferketten für Solarkraftstoffe, könnte eine größere lokale Nachfrage auslösen und dazu beitragen, Afrikas Nachfrage nach Solarkraftstoffen schneller als ursprünglich erwartet, zu erhöhen.

6.3. Aufbau eines Internationalen Forums für Solarkraftstoffe

Das Internationale Forum für Solarkraftstoffe konzentriert sich auf die Entwicklung eines starken weltweiten Kommunikationsnetzwerks zur Förderung des Expertenbewusstseins und des Informationsaustauschs über Solarkraftstoffe und soll die Forschung und die Kommunikation der Studienergebnisse unterstützen. Das zu diesem Zweck geschaffene Internationale Forum für Solarkraftstoffe, führte internationale Interessengruppen von wissenschaftlichen Experten, Behörden, Interessensvertretern der Industrie und Akteuren der Zivilgesellschaft zusammen, um über die Forschung und Investitionen in Solarkraftstoffe zu diskutieren.

Die entwickelte Kommunikationsstrategie besteht aus vielen verschiedenen Elementen, die den Projektumfang und die Spezifikationen widerspiegeln. Die Strategie erläutert die

verschiedenen Instrumente, Methoden und Maßnahmen, die zum erfolgreichen Aufbau und zur Einbindung eines Kommunikationsnetzwerks für Solarkraftstoffe ergriffen wurden, wobei die Kontextfaktoren während der Implementierung berücksichtigt wurden.

Für den Aufbau des Kommunikationsnetzwerks für Solarkraftstoffe waren drei grundlegende Elemente erforderlich. Von entscheidender Bedeutung war die Berücksichtigung der Privatsphäre und des Datenschutzes, um sicherzustellen, dass das Netzwerk über die entsprechenden Datenschutzmaßnahmen verfügt. Die für das Projekt erstellte Datenschutzrichtlinie und die Art der Kontaktaufnahme mit Interessensvertretern garantierten den Datenschutz und die Vertraulichkeit der von den Interessensvertretern gesammelten Daten. Ein detaillierter Aktionsplan für die Kommunikation wurde entwickelt, damit relevante Interessengruppen identifiziert wurden und Kontakt mit ihnen aufgenommen werden konnte. Dadurch konnte ein Netzwerk geschaffen werden, welches zur Folge hatte, dass Interessensvertreter Informationen über das Projekt mit ihren eigenen Netzwerken teilten, dies kreierte einen Multiplikatoreffekt. Letztendlich war eine visuelle Identität entscheidend für die Sichtbarkeit und Anerkennung des Projekts bei den Interessensvertretern.

Zu diesen drei Elementen der Kommunikationsstrategie wurden die wichtigsten Tools zum Aufbau des Netzwerks hinzugefügt: die technische Komponente in Form einer Webex-Lösung um Workshops des Netzwerks abzuhalten und die Projektwebseite. Die EY Projektwebseite war der zentrale Sammelpunkt, um sich für das Projekt zu registrieren und Informationen zur Studie einzuholen. Auf der technischen Plattform von Webex Meetings und Webex Teams, fanden außerdem das International Solar Fuel Forum und die virtuellen Workshops statt. Mit mehreren nützlichen Funktionen als Gastgeber von internationaler Videokonferenzen und virtuellen Chat-Bereichen, bot Webex die benutzerfreundlichste sowie zugänglichste Möglichkeit für ausgewogene Diskussionen an.

Kontextfaktoren spielten eine Rolle bei der weiteren Gestaltung des Kommunikationsnetzwerks. Der weltweite Ausbruch der COVID-19 Pandemie und die nationalen Maßnahmen zur Eindämmung der Ausbreitung des Virus, veränderten das Kommunikationsumfeld. Um die physische Distanzierung zu respektieren, wurde mehr Kommunikation in den digitalen Bereich verlagert, was dazu führte, dass die Projektwebseite stark besucht war. Projektteilnehmer kamen aus der ganzen Welt und dies wurde bei der Planung der Workshops berücksichtigt, indem die Startzeiten für die verschiedenen Zeitzonen variiert wurden.

Die Zusammenarbeit mit dem Kommunikationsnetzwerk für Solarkraftstoffe erfolgte über vier Hauptaktivitäten. Das E-Mail-Netzwerk war der Hauptkontaktpunkt zu den Interessensvertretern, um Aktualisierungen des Projekts und Einladungen zu den Aktivitäten zu verbreiten. Das Forum für Webex-Teams war der zentrale Diskussionsbereich für die Interessengruppen und diente als Informationsquelle für die Projektaktivitäten. Die Umfrage zu Solarkraftstoffen hat eine direkte Beteiligung der Interessengruppen an der Studienmethodik, den Eingabedaten und den Produktionswegen geschaffen, welche auch in die Diskussionen auf den Workshops einfließen. Schließlich waren die virtuellen Workshops der Hauptpunkt für die Einbeziehung der Interessensvertreter, bestehend aus Präsentationen und Diskussionen über virtuelle Videokonferenzen.

Das erstellte Kommunikationsnetzwerk für Solarkraftstoffe existiert in Webex-Teams als Internationales Solarkraftstoffforum und als Datenbank mit 70 registrierten Interessensvertretern. Diese Interessengruppen könnten im Rahmen des Projekts weiterhin von der Europäischen Kommission kontaktiert werden, sollte der Wunsch bestehen, das Netzwerk weiterzuführen.

Getting in touch with the EU

IN PERSON

All over the European Union there are hundreds of Europe Direct information centres.

You can find the address of the centre nearest you at: https://europa.eu/european-union/contact_en

ON THE PHONE OR BY EMAIL

Europe Direct is a service that answers your questions about the European Union.

You can contact this service:

- by freephone: 00 800 6 7 8 9 10 11 (certain operators may charge for these calls),
- at the following standard number: +32 22999696, or
- by email via: https://europa.eu/european-union/contact_en

Finding information about the EU

ONLINE

Information about the European Union in all the official languages of the EU is available on the Europa website at: https://europa.eu/european-union/index_en

EU PUBLICATIONS

You can download or order free and priced EU publications from:

<https://op.europa.eu/en/publications>. Multiple copies of free publications may be obtained by contacting Europe Direct or your local information centre (see https://europa.eu/european-union/contact_en)

EU LAW AND RELATED DOCUMENTS

For access to legal information from the EU, including all EU law since 1952 in all the official language versions, go to EUR-Lex at: <http://eur-lex.europa.eu>

OPEN DATA FROM THE EU

The EU Open Data Portal (<http://data.europa.eu/euodp/en>) provides access to datasets from the EU. Data can be downloaded and reused for free, for both commercial and non-commercial purposes.

This report presents the key findings of the study, ranging from the identification of solar fuel value chains, a technology and economic roadmap of solar fuel technologies through 2100, a market outlook for solar fuels and the development of the International Solar Fuel Forum as a virtual platform for exchange between solar fuel stakeholders.

Studies and reports



Publications Office
of the European Union