



E-Fuel

Eine alternative zu Elektromobilität

Stefano Mungo

1 Inhaltsverzeichnis

1	<i>InhaltsverzeichnisManagement summary</i>	2
1	<i>Management summary</i>	4
2	<i>Projektplanung</i>	5
2.1	Ausgangslage und Projektbegründung	5
2.2	Sinn und Zweck, Nutzen	6
2.3	Zielsetzung	6
2.4	Rahmenbedingungen	6
2.5	Projektstrukturplanung	7
2.6	Projektablaufplanung (Zeitplan Soll und Ist)	8
2.7	Projektphasen und Meilensteine	8
3	<i>Projektrealisierung</i>	9
3.1	Was ist E-Fuel und wie werden sie hergestellt	9
3.2	Bereitstellung Ausgangsstoffe	10
3.2.1	Wasserstoff	10
3.2.2	Wasserstoff als Energieträger	10
3.2.3	Erzeugung Wasserstoff	11
3.2.3.1	Elektrolyse Grüner Wasserstoff	11
3.2.3.2	Elektrolysemethoden	12
3.2.3.2.1	Alkalische Elektrolyse	12
3.2.3.2.2	Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse)	13
3.2.3.2.3	HTE-Elektrolyse (Hochtemperatur- oder Dampfelektrolyseur)	13
3.2.3.3	Dampfreformierung grauer und blauer Wasserstoff	14
3.2.4	Kohlenstoff	15
3.2.5	Kohlenstoff und Klimaneutralität	15
3.2.6	Direct Air Capture (DAC)	16
3.2.7	Synthesegas	16
3.3	Kraftstoffsyntaxe	17
3.3.1	Fischer-Tropsch-Synthese	17
3.3.1.1	Historischer Hintergrund	17
3.3.1.2	Funktionsweise der Fischer-Tropsch-Synthese	19
4	<i>E-Fuel Produktion und Nutzung</i>	20
4.1	Wo werden Diese E-Fuels produziert?	20
4.1.1	Pilotprojekt der Automarke Porsche in Patagonien «Haru Oni»	20
4.1.2	Pilotprojekt der ETH Zürich «Synhelion»	21
4.1.2.1	Herstellungstechnologie	21
4.1.2.2	Produktionsstandorte und Kapazität	22
4.2	Transport- und Lagerfähigkeit von E-Fuels	23
4.3	Drop-in-Fähigkeit der E-Fuels	23
4.3.1	Energiedichte verschiedener Energieträger im Vergleich	24
4.4	Wirtschaftlichkeit und Herausforderung von E-Fuels	26
4.4.1	E-Fuel-Kosten	26
4.4.2	Kosten für CO ₂ -Abscheidung	28

4.4.3	Kosten der Fischer-Tropsch-Synthese.....	28
4.4.4	Effizienz und Energiebedarf der Eingangsenergie	29
4.4.5	Potenzial für die Produktion im grossen Massstab.....	30
4.4.6	Produktion von E-Fuels	30
4.4.7	Infrastrukturanforderungen	30
4.4.8	Zusätzliche Produkte.....	31
4.5	SWOT-Analyse	32
4.6	Zukunft Aussichten	34
4.6.1	Globale Energiepotenziale nutzbar machen:.....	34
4.6.2	Effizienzunterschiede werden ausgeglichen	35
4.6.3	Kraftstoffkosten und Ausblick	36
5	Projektabschluss	38
5.1	Meine Meinung zu E-Fuels	38
5.2	Reflexion / Lessons Learned.....	39
6	Literaturverzeichnis	40
6.1	Abbildungsverzeichnis	42
7	Anhang	43
7.1	Arbeitsjournal.....	43
7.2	Redlichkeit Erklärung	44

2 Management summary

E-Fuels sind synthetische Kraftstoffe, die aus Wasserstoff und CO₂ erzeugt werden. Sie bieten eine CO₂-neutrale Alternative zu fossilen Brennstoffen und sind besonders interessant für Oldtimer und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Diese Kraftstoffe ermöglichen eine nahezu emissionsfreie Mobilität, ohne dass grössere technische Anpassungen an bestehenden Motoren nötig sind.

Die Herstellung von E-Fuels ist jedoch energieintensiv. Zur Produktion wird CO₂ aus der Atmosphäre entnommen, und grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyseverfahren wie die alkalische Elektrolyse oder die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM) gewonnen. Dabei kommt erneuerbarer Strom zum Einsatz, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten, ein Prozess, der hohe Energiemengen erfordert. Der erzeugte Wasserstoff wird anschliessend durch chemische Synthese mit CO₂ verbunden, wodurch der E-Fuel entsteht und der CO₂-Kreislauf geschlossen wird.

E-Fuels könnten dennoch erheblich zur Einhaltung der Klimaziele des Pariser Abkommens beitragen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung fordert. Besonders in Bereichen, wo Elektromobilität schwer umsetzbar ist, wie im Schwerlast- und Luftverkehr, bieten E-Fuels eine vielversprechende Lösung. Dank ihrer "Drop-in-Kompatibilität" können sie direkt in bestehenden Infrastrukturen und Motoren verwendet werden.

Pilotprojekte wie das von Synhelion zeigen das Potenzial von E-Fuels, verdeutlichen jedoch auch die Herausforderungen. Die hohen Kosten und der erhebliche Energiebedarf bei der CO₂-Abscheidung und Synthese machen die grossflächige Produktion zurzeit schwierig. Eine SWOT-Analyse zu E-Fuels hebt zwar die globalen Energie- und Umweltvorteile hervor, zeigt aber auch technologische und wirtschaftliche Hürden. Dennoch bieten E-Fuels eine vielversprechende Perspektive für nachhaltige Mobilität.

3 Projektplanung

3.1 Ausgangslage und Projektbegründung

Ich möchte mich in der E-Fuels Thematik vertiefen, da ich mich für Mobilität interessiere. Ich selbst fahre ein Oldtimer. Die Oldtimer sind für mich Kulturgut der Mobilität. Diese sollten meiner Meinung nach unverändert erhalten bleiben, sichtbar sein und auf den Strassen gefahren werden. Durch E-Fuels können Oldtimer sowie moderne Verbrennungsmotoren CO₂ Neutral gefahren werden. Die E-Fuels-Technologie kann dazu beitragen, das Ziel des Pariser Abkommens zu erreichen, bis zum Jahr 2050 CO₂-neutral zu werden.

E-Fuels, auch als synthetische Kraftstoffe bekannt, sind flüssige Brennstoffe, die aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden. Im Produktionsprozess wird Wasser durch Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten, wobei der benötigte Strom idealerweise aus erneuerbaren Energien stammt. Anschliessend wird der Wasserstoff mit CO₂ chemisch verbunden, das aus der Atmosphäre oder industriellen Abgasen entnommen wird. Dieser Prozess erzeugt Kohlenwasserstoffe, die in Form von Benzin, Diesel oder Kerosin gespeichert und in herkömmlichen Verbrennungsmotoren verwendet werden können. Die Speicherung von E-Fuels erfolgt ähnlich wie bei fossilen Kraftstoffen, in Tanks, die für flüssige Brennstoffe ausgelegt sind.

E-Fuels bieten eine zusätzliche Option für CO₂-neutrale Mobilität, weil sie den Betrieb herkömmlicher Verbrennungsmotoren «von Oldtimern bis zu modernen Autos» ermöglichen, ohne dass diese umgerüstet oder ersetzt werden müssen. Die CO₂-Neutralität ergibt sich daraus, dass das CO₂, das bei der Verbrennung freigesetzt wird, zuvor in der Herstellung aus der Atmosphäre oder anderen Quellen entnommen wurde. So bleibt der CO₂-Kreislauf in der Bilanz ausgeglichen.

Diese Technologie könnte helfen, das Ziel des Pariser Abkommens zu erreichen, das die Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, idealerweise auf 1,5 °C, im Vergleich zu vorindustriellen Werten vorsieht.¹ Über 190 Staaten, darunter die Europäische Union, die USA und China, haben sich dem Abkommen angeschlossen, jedoch gab es in der Vergangenheit immer wieder Rückschläge, wie etwa den zeitweiligen Austritt der USA unter der Trump-Regierung. China, der grösste Emittent von CO₂, hat zugesagt, bis 2060 CO₂-neutral zu werden², während die USA und die EU das Jahr 2050 als Zielmarke für CO₂-Neutralität anstreben. CO₂-neutral zu sein bedeutet, dass sämtliche CO₂-Emissionen, die durch menschliche Aktivitäten entstehen, entweder durch natürliche Prozesse oder technologische Lösungen wie CO₂-Abscheidung kompensiert werden, sodass unterm Strich kein zusätzlicher Kohlenstoff in die Atmosphäre gelangt.

Die Einführung von E-Fuels könnte eine wichtige Rolle spielen, um diese Ziele zu erreichen, insbesondere in Bereichen, in denen Elektromobilität schwer umsetzbar ist, wie beispielsweise im Luft- oder Schwerlastverkehr. So kann die Zukunft ressourcenschonend gestaltet werden, ohne dass die Mobilität ausschliesslich auf Elektroantriebe angewiesen ist.

¹ [1]

² [2]

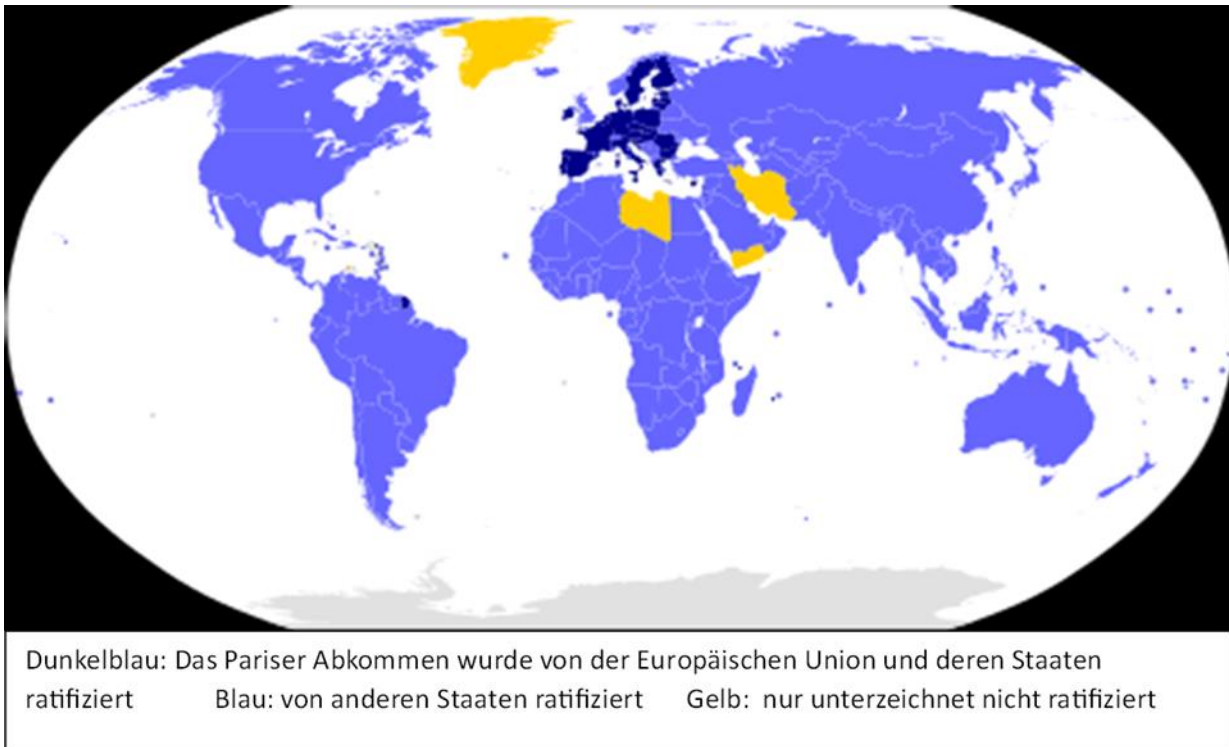


Abbildung 1: Pariser Abkommen beteiligte Staaten

3.2 Sinn und Zweck, Nutzen

Ziel ist eine umfassende Recherche zur E-Fuels-Thematik, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie diese als CO₂-Entlastung oder -Ersatz genutzt werden könnten.

Die vorliegende Arbeit soll auch Individuen ansprechen, die sich für dieses Thema interessieren, und ihnen die Möglichkeit bieten, sich einen verständlichen Überblick mit aktuellen Quellen und Informationen zu verschaffen. Sie wird entsprechend verständlich geschrieben sein, damit auch Menschen ohne technischen Hintergrund eine Vorstellung von E-Fuels erhalten.

Dieses Dokument soll zudem dazu dienen, eine Diskussionsrunde anzuregen, in der verschiedene Aspekte von E-Fuels besprochen werden können.

3.3 Zielsetzung

Ich möchte aufzeigen was E-Fuels ist, wie es hergestellt wird und gespeichert werden kann. Darüber hinaus möchte ich zeigen, dass E-Fuels eine zusätzliche Option für eine CO₂-neutrale Mobilität bieten. Die Zukunft kann ressourcenschonend gestaltet werden, ohne vollständig auf Elektromobilität angewiesen zu sein.

3.4 Rahmenbedingungen

Theoretische Vertiefungsarbeit zum synthetischen Treibstoff E-Fuels. Darin werden die Herstellung, Nutzung und Speicherung der E-Fuels Energie im Schwerpunkt Mobilität und Transport aufgezeigt.

Es werden keine Testfahrten und Abgasauswertungen gemacht, da dies Zeitlich und Finanziell nicht möglich ist.

Der Einbezug von bestehenden Erfahrungswerten, durch Hersteller, wird in die Arbeit miteinfließen. Ausserdem wird eine kritische Würdigung zum Thema erstellt.

3.5 Projektstrukturplanung

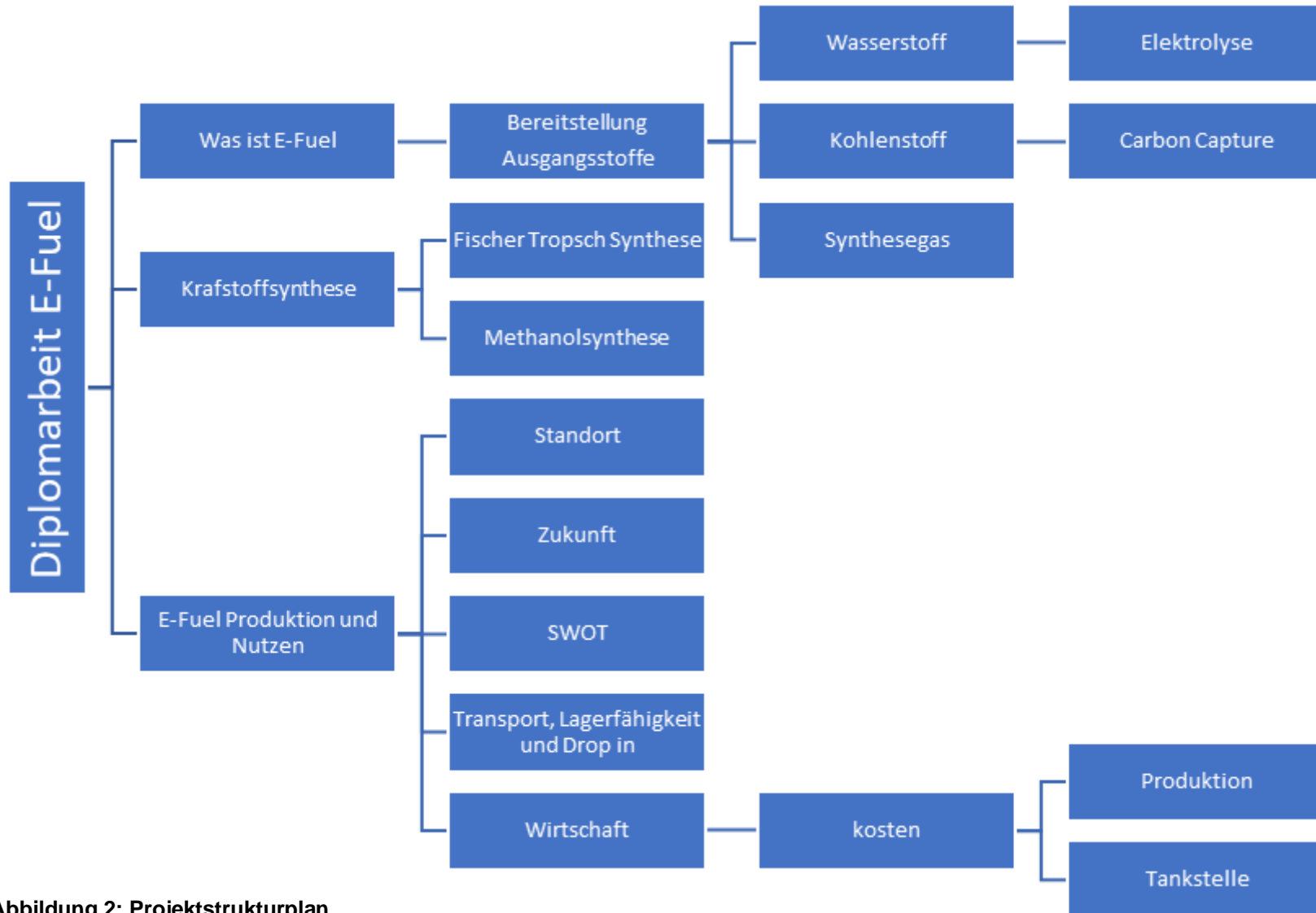


Abbildung 2: Projektstrukturplan

3.6 Projektablaufplanung (Zeitplan Soll und Ist)

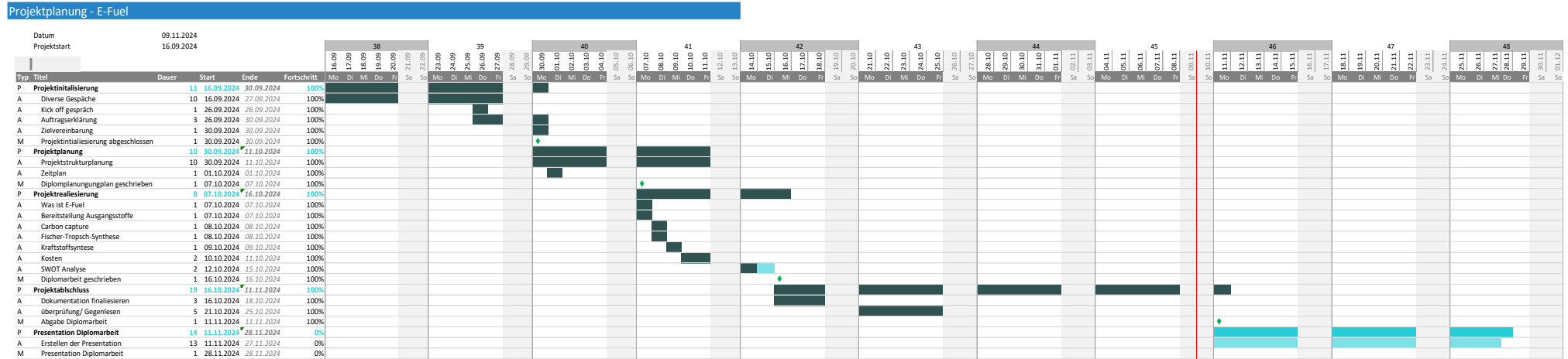


Abbildung 3: Projektablaufplanung

3.7 Projektphasen und Meilensteine

- 30.09.24 Projektinitialisierung abgeschlossen
- 07.10.24 Diplomplanungsplan geschrieben
- 16.10.24 Diplomarbeit Fertig geschrieben
- 10.10.24 Diplomarbeit Fertigstellen und Abgabe
- 28.11.24 Präsentation Diplomarbeit

4 Projektrealisierung

4.1 Was ist E-Fuel und wie werden sie hergestellt

E-Fuels sind eine spezielle Art von Kraftstoffen, die eine wichtige Rolle in der Energiewende spielen, da sie CO₂-Emissionen reduzieren können, indem sie atmosphärisches CO₂ wiederverwerten. Bei der Verbrennung von E-Fuels wird Kohlendioxid freigesetzt, jedoch stammt der Kohlenstoff aus bereits vorhandenem CO₂, sodass sie nicht zusätzlich zur CO₂-Bilanz beitragen. Dies ist entscheidend für den Klimaschutz, da es wichtig ist, kein neues CO₂ in die Atmosphäre zu bringen.

In der Europäischen Union werden E-Fuels zusammen mit grünem Wasserstoff als RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) klassifiziert. Diese Kraftstoffe sind flüssig oder gasförmig und unterscheiden sich von herkömmlichen Biokraftstoffen, die aus biologischen Quellen stammen. Die Herstellungsverfahren für E-Fuels fallen unter die Kategorie Power-to-X (PtX), wobei „X“ das jeweilige Endprodukt bezeichnet. Bei der Produktion von gasförmigen Kraftstoffen, wie synthetischem Methan, spricht man von Power-to-Gas (PtG), während Power-to-Liquid (PtL) Prozesse zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe, wie Kerosin oder Diesel, eingesetzt werden.

Die chemischen Syntheseverfahren, die für E-Fuels verwendet werden, sind entscheidend für ihre Klassifizierung als synthetische Kraftstoffe. Während E-Fuels spezifisch aus grünem Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden, können synthetische Kraftstoffe auch aus anderen Quellen, wie der Vergasung von Kohle oder Biomasse oder durch Reformierung von Erd- oder Biogas, gewonnen werden. Somit sind alle E-Fuels synthetische Kraftstoffe, jedoch nicht alle synthetischen Kraftstoffe sind E-Fuels.

Die Nutzung bereits vorhandenen Kohlenstoffs und die Ausnutzung seiner vorteilhaften chemischen Eigenschaften sind besonders relevant, da der globale Primärenergiebedarf in Zukunft voraussichtlich steigen wird. E-Fuels bieten somit die Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss im Verkehrssektor zu reduzieren und tragen zu einer nachhaltigeren Energiezukunft bei. Sie ermöglichen die Verwendung bestehender Infrastrukturen für fossile Brennstoffe und können somit einen wichtigen Beitrag zum Übergang zu einer umweltfreundlicheren Energieversorgung leisten.³

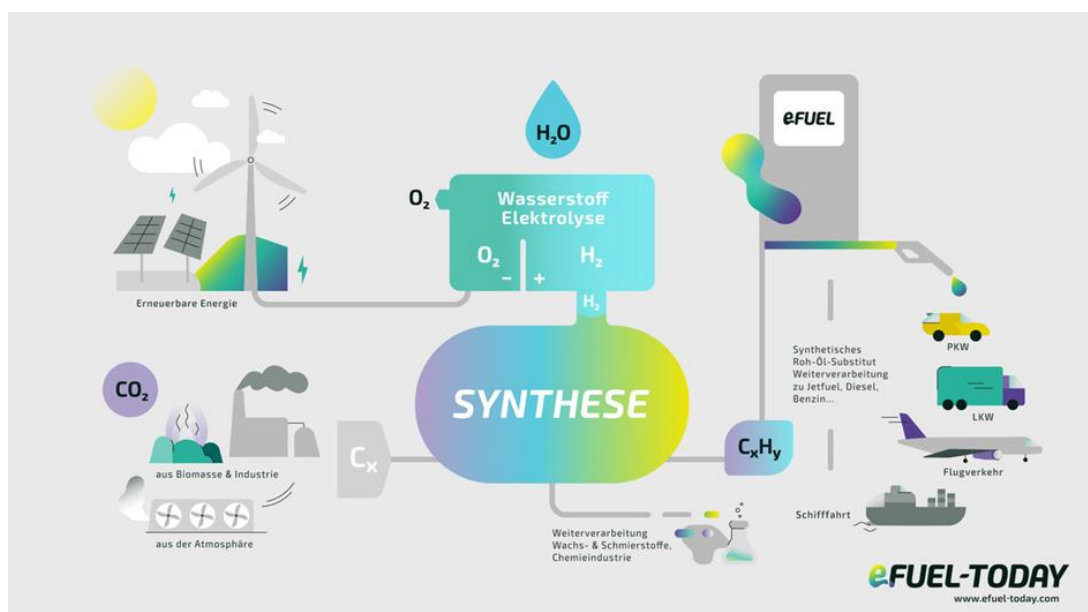


Abbildung 4: Produktionspfad E-Fuel

³ [3]

4.2 Bereitstellung Ausgangsstoffe

4.2.1 Wasserstoff

Wasserstoff ist das leichteste und häufigste Element im Universum und hat das chemische Symbol H. Es besteht aus einem Proton und einem Elektron und ist im Periodensystem das erste Element. In seiner natürlichen Form ist Wasserstoff ein farbloses, geruchloses und ungiftiges Gas, das aus zwei Wasserstoffatomen (H_2) besteht. Es ist ein hoch reaktives Element und verbindet sich leicht mit anderen Elementen, weshalb es in der Natur selten in reiner Form vorkommt. Stattdessen findet man es oft in Verbindungen, wie im Wasser (H_2O) oder in organischen Verbindungen.⁴

4.2.2 Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger der Zukunft. Er ist sauber und vielseitig einsetzbar. Bei der Nutzung als Brennstoff entsteht lediglich Wasser (H_2O). Dabei werden keine Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2) freigesetzt. Diese Eigenschaften machen Wasserstoff besonders attraktiv für die klimafreundliche Energieerzeugung. Durch seinen Einsatz können die CO_2 -Emissionen erheblich reduziert werden. Wasserstoff findet Anwendung in der Industrie, im Verkehr und zur Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Durch seine Flexibilität und Umweltfreundlichkeit hat er das Potenzial, eine zentrale Rolle in der zukünftigen Energieversorgung zu spielen.⁵

	Eigenschaften verschiedener Brenn- und Kraftstoffe			
	Einheiten	Erdgas	Wasserstoff	Benzin
• Wasserstoff – das häufigste Element in unserem Universum – ist als chemisches Element in gebundener Form in nahezu allen organischen Verbindungen vorhanden.	Heizwert [kWh/kg]	13,12	33,33	11,60
• Weltweit werden im Jahr über 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff verbraucht, 99 Prozent davon in der Industrie, zum Beispiel zur Ammoniakproduktion oder zur Stahlherstellung.	Heizwert [kWh/m ³]	10,42	3,00	8.677,00
• Wasserstoff ist 14-mal leichter als Luft, weder giftig, noch ätzend oder radioaktiv, entzündet sich nicht selbst und verbrennt mit farbloser Flamme rückstandsfrei.	Brennwert [kWh/m ³]	11,42	3,54	10.173,00
• Wasserstoff kann als effizienter Langzeitspeicher für erneuerbare Energie dienen.	Dichte [kg/m ³]	0,79	0,09	748,00
	CO ₂ -Emission [kg/kWh]	0,20	0,00*	0,26
	Verbrennungsgeschwindigkeit [cm/s] in Luft	43,00	265,00	40,00

* bei grünem Wasserstoff

Abbildung 5: Zahlen und Fakten zu Wasserstoff

⁴ [4]

⁵ [4]

4.2.3 Erzeugung Wasserstoff

Um das volle Potenzial von Wasserstoff auszuschöpfen, sind nachhaltige und effiziente Methoden zur Herstellung entscheidend. Die Produktion von Wasserstoff erfolgt durch verschiedene Verfahren, die jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bringen. Diese Verfahren reichen von umweltfreundlichen Ansätzen, die erneuerbare Energien nutzen, bis hin zu traditionellen Methoden, die auf fossilen Brennstoffen basieren. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff vorgestellt

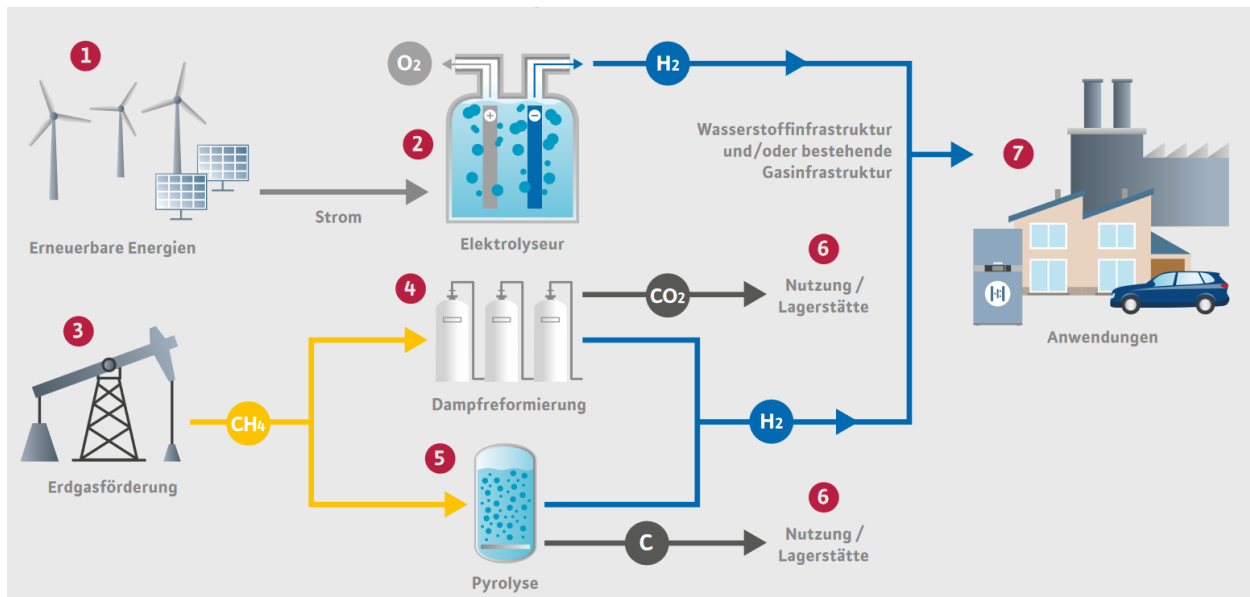


Abbildung 6: Erzeugungspfad Wasserstoff

4.2.3.1 Elektrolyse Grüner Wasserstoff

Eine der umweltfreundlichsten Methoden zur Wasserstoffproduktion ist die Elektrolyse. Bei diesem Verfahren wird Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. „Elektrolyse“ bezeichnet die Aufspaltung einer chemischen Verbindung durch den Einsatz von elektrischem Strom. Durch die Elektrolyse werden die in der Verbindung enthaltenen Stoffe voneinander getrennt. Dieser Prozess findet in einem Elektrolyseur statt, der zwei Elektroden (Anode und Kathode), eine Gleichstromquelle und ein Elektrolyt (z.B. reines Wasser oder alkalische Verbindungen) benötigt. Da Wasserstoff (H_2) nur in gebundener Form existiert, muss er erst aus dieser Verbindung gelöst werden. Bei der Wasserelektrolyse werden aus zwei Wassermolekülen ($2H_2O$) je zwei Wasserstoffmoleküle ($2H_2$) und ein Sauerstoffmolekül (O_2) gewonnen.⁶

Besonders vorteilhaft ist die Elektrolyse, wenn der verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie stammt. In diesem Fall spricht man von grünem Wasserstoff. Grüner Wasserstoff spielt eine zentrale Rolle bei der Herstellung von E-Fuels, da er mit Kohlendioxid (CO_2) kombiniert wird, um synthetische Kraftstoffe zu erzeugen. Diese Kraftstoffe können in bestehenden Verbrennungsmotoren und der Infrastruktur verwendet werden, was den Übergang zu einer klimaneutralen Mobilität erheblich erleichtert.

⁶ [6]

4.2.3.2 Elektrolysemethoden

Für die Elektrolyse gibt es verschiedene Verfahren, die sich in ihrer Technologie und Anwendung unterscheiden. Die zwei wichtigsten Methoden sind die AEL-Elektrolyse (alkalischer Elektrolyseur) und die PEM-Elektrolyse (Proton Exchange Membrane).

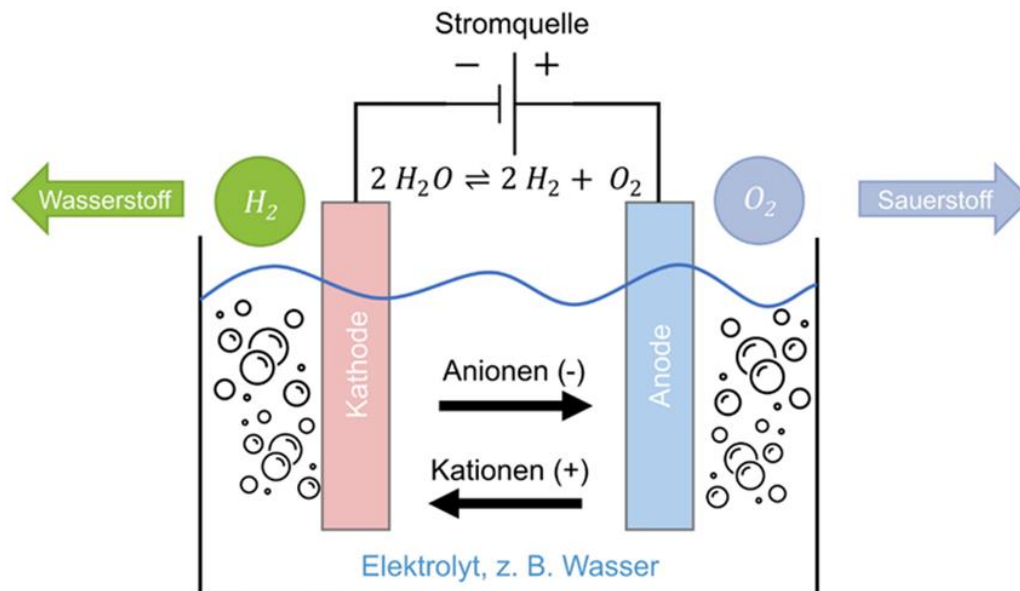


Abbildung 7: Grundprinzip der Wasser-Elektrolyse

4.2.3.2.1 Alkalische Elektrolyse

Alkalische Elektrolyse ist die älteste Form der Elektrolyse, die seit etwa einem Jahrhundert in industriellem Massstab genutzt wird. Hierbei wird ein poröser Separator verwendet, der die Gase Wasserstoff und Sauerstoff physikalisch trennt, während der Elektrolyt weiterhin durch den Separator zirkuliert. Die Konversionseffizienz der alkalischen Elektrolyse liegt bei etwa 66 %. Alkalische Elektrolyseure sind in der Lage, relativ flexibel auf Schwankungen in der Stromversorgung zu reagieren, haben jedoch Einschränkungen im Lastbereich (zwischen 15 % und 100 %) und eine lange Reaktionszeit bei einem Kaltstart, die etwa 50 Minuten beträgt.⁷

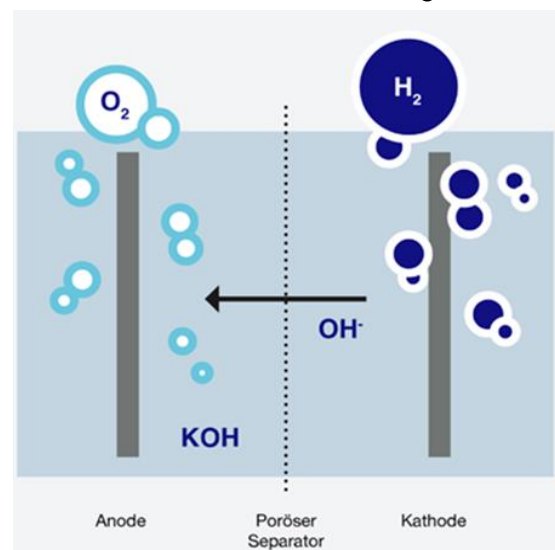


Abbildung 8: Alkalische Elektrolyseur

⁷ [6]

4.2.3.2 Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse)

Die PEM-Elektrolyse (Proton Exchange Membrane) basiert auf einer protonenleitenden Membran, die als Feststoffelektrolyt dient. Diese Membran isoliert die Anode von der Kathode und ermöglicht den Durchfluss von Protonen, was den Stromkreis schliesst. Die PEM-Elektrolyse zeichnet sich durch eine höhere Flexibilität in der Teillast aus, mit einer Effizienz ähnlich der alkalischen Elektrolyse. Ein grosser Vorteil der PEM-Elektrolyse ist ihre schnelle Reaktionszeit. Beim Kaltstart benötigt sie etwa 10 Minuten, um zu starten, und kann innerhalb von 10 Sekunden aus dem Stand-by-Betrieb die volle Leistung erreichen.⁸

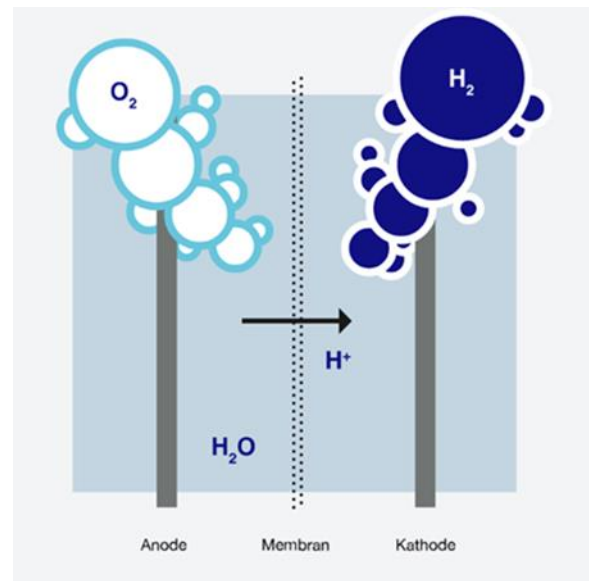


Abbildung 9: PEM-Elektrolyse

4.2.3.2.3 HTE-Elektrolyse (Hochtemperatur- oder Dampfelektrolyseur)

Ein Hochtemperatur-Elektrolyseur (Hochtemperatur = HTE) arbeitet je nach Aufbau im Temperaturspektrum zwischen $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis ca. $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobei der Wirkungsgrad der Temperatur entsprechend zunimmt. Im Vergleich zu AEL- und PEM-Elektrolyseuren benötigt er keine Edelmetallkomponenten. Bei der HTE-Elektrolyse für die Wasserstoffproduktion trifft der Wasserdampf auf eine Festoxid-Elektrolysezelle. In dieser erfolgt die Spaltung der Wassermoleküle über Nickel-Cermet Dampf-Wasserstoffelektroden und Mischoxide aus Lanthan, Strontium und Cobalt-Sauerstoffelektroden.

Die HTE-Elektrolyse gewährleistet eine hohe Effizienz: Mit Wirkungsgraden von bis zu 90% gilt die Hochtemperatur-Elektrolyse als besonders effizienter Weg zur industriellen Wasserstoffherstellung. Ihre Vorteile liegen im Bereich energieintensiver Sektoren, wie etwa der Stahlindustrie, wo grosse Mengen an Abwärme verfügbar sind und in der Hochtemperatur-Elektrolyse genutzt werden können. Aktuell befindet sich die HTE-Elektrolyse noch in der Pilotphase.⁹

⁸ [6]

⁹ [6]

4.2.3.3 Dampfreformierung grauer und blauer Wasserstoff

Neben der Elektrolyse ist die Dampfreformierung eine etablierte Methode zur Wasserstoffproduktion. Bei dieser Technik wird Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, unter Druck und hohen Temperaturen mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Die Dampfreformierung ist wirtschaftlich attraktiv und kann grosse Mengen Wasserstoff liefern, jedoch entsteht dabei auch CO_2 .

Der Wasserstoff wird daher als grauer Wasserstoff klassifiziert. Grauer Wasserstoff deckt zwar kurzfristig den steigenden Bedarf an Wasserstoff, trägt aber nicht zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei. Eine Weiterentwicklung ist der blaue Wasserstoff, bei dem das entstehende CO_2 durch Carbon Capture and Storage (CCS) abgeschieden und gespeichert wird. Dadurch werden die Emissionen erheblich reduziert, jedoch bleibt das Verfahren kostenintensiv und komplex.¹⁰

¹⁰ [7]

4.2.4 Kohlenstoff

Kohlenstoff ist ein chemisches Element mit dem Symbol C und gehört zur Gruppe der Nichtmetalle. Es ist ein zentrales Element des Lebens und bildet die Grundlage für alle bekannten organischen Moleküle. Kohlenstoff kommt in der Natur in verschiedenen Formen vor, darunter als Graphit und Diamant. In seiner natürlichen Form kann Kohlenstoff als festes Material auftreten, das in vielen Materialien, wie beispielsweise Kohle, vorkommt. Kohlenstoff ist auch in der Atmosphäre in Form von Kohlendioxid (CO_2) vorhanden, einem Gas, das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Zersetzung von organischem Material und verschiedenen industriellen Prozessen freigesetzt wird.¹¹

Diese CO_2 -Emissionen tragen erheblich zum Treibhauseffekt und damit zum Klimawandel bei. Der Ursprung des Kohlenstoffs, der in industriellen Prozessen genutzt wird, ist daher entscheidend für dessen Einfluss auf das Klima. Kohlenstoff kann sowohl aus fossilen Brennstoffen als auch aus erneuerbaren Quellen stammen, und seine Herkunft bestimmt massgeblich, ob die damit verbundenen Prozesse klimaneutral sind oder nicht.

4.2.5 Kohlenstoff und Klimaneutralität

Die Herkunft des Kohlenstoffs spielt eine zentrale Rolle in der Frage der Klimaneutralität. Kohlenstoff aus fossilen Brennstoffen erhöht die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, während Kohlenstoff, der bereits in der Luft vorhanden oder in industriellen Prozessen freigesetzt wurde, wiederverwendet werden kann, ohne zusätzliche Emissionen zu verursachen. Für die Produktion von E-Fuels, einer klimafreundlichen Alternative zu fossilen Brennstoffen, ist Kohlenstoff ein unverzichtbarer Bestandteil. Dieser Kohlenstoff kann entweder durch Carbon Capture direkt aus der Atmosphäre entnommen oder aus industriellen Quellen wie Kehrlichtverbrennungsanlagen gewonnen werden, wo die CO_2 -Konzentration höher ist.

In Kehrlichtverbrennungsanlagen wird CO_2 als Nebenprodukt bei der Abfallverbrennung freigesetzt. Statt dieses CO_2 ungenutzt in die Atmosphäre entweichen zu lassen, können Technologien zur CO_2 -Abscheidung eingesetzt werden, um das entstehende CO_2 aufzufangen und es für die E-Fuel-Produktion bereitzustellen. Diese industriellen Anlagen bieten somit wertvolle Quellen für Kohlenstoff, der durch moderne Technologien effizient eingefangen und genutzt werden kann. Dies trägt zu umweltfreundlicheren Produktionsmethoden bei und unterstützt die Entwicklung klimaneutraler Kraftstoffe.

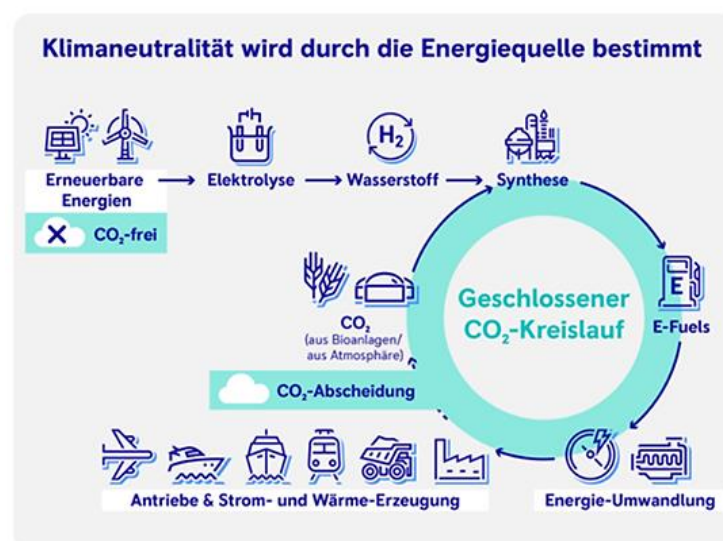


Abbildung 10: Kohlendioxid Kreislauf

¹¹ [8]

4.2.6 Direct Air Capture (DAC)

Neben industriellen Quellen kann Kohlenstoff auch durch Direct Air Capture (DAC) direkt aus der Luft gefiltert werden. Diese Technologie saugt Umgebungsluft an und leitet sie durch spezielle Filter, die das CO₂ aus der Luft binden. Sobald der Filter gesättigt ist, wird er geschlossen und auf etwa 100 °C erhitzt. Durch diese Erwärmung lösen sich die CO₂-Moleküle vom Filter und werden in konzentrierter Form gesammelt. Dieser Prozess ist entscheidend, um die CO₂-Emissionen effektiv zu reduzieren und das gefilterte CO₂ für die Produktion von E-Fuels nutzbar zu machen.¹²

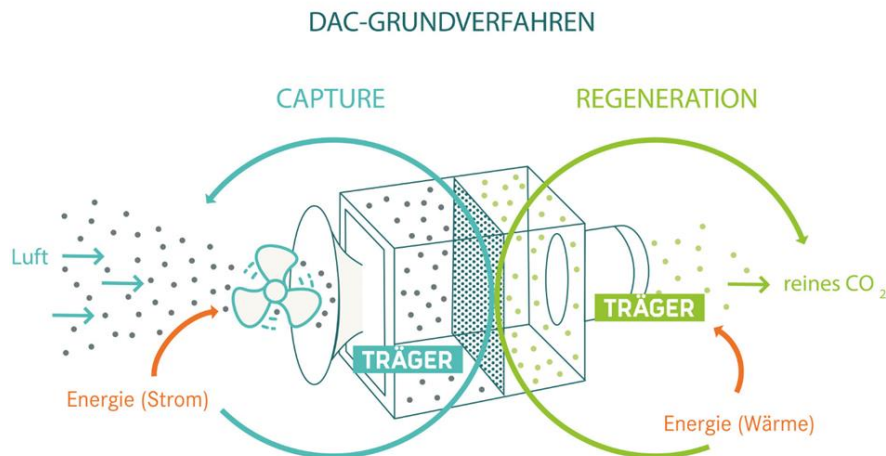


Abbildung 11: Verfahren Direct Air Capture

4.2.7 Synthesegas

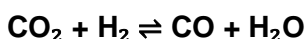
Synthesegas ist ein wichtiges Gasgemisch. Es besteht hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). Synthesegas wird in der chemischen Industrie verwendet. Man nutzt es zur Herstellung von Kraftstoffen, Chemikalien und Wasserstoff.

Synthesegas spielt auch eine grosse Rolle bei der Nutzung erneuerbarer Energien. Es hilft, überschüssige Energie zu speichern und sie später zu verwenden. Dadurch unterstützt es den Übergang zu einem umweltfreundlicheren Energiesystem.

Die Herstellung von Synthesegas erfolgt aus kohlenstoffhaltigen Rohstoffen. Dazu gehören fossile Brennstoffe, Biomasse und Abfälle. Für die Produktion von E-Fuels wird Wasserstoff (H₂) und Kohlendioxid (CO₂) verwendet.

Ein wichtiger Schritt in diesem Prozess ist die reverse Wassergaskonvertierung (rWGS). Bei dieser chemischen Reaktion reagieren CO₂ und H₂.¹³

Die Reaktion sieht so aus:¹⁴



Dabei entsteht Kohlenmonoxid (CO) und Wasserdampf (H₂O) als Nebenprodukt. Oft wird zusätzlich Wasserstoff zugeführt, um die Effizienz zu erhöhen. Die rWGS-Reaktion ist endotherm. Das bedeutet, dass sie Wärme aus der Umgebung aufnehmen muss, um abzulaufen. Diese Wärme kann von einem elektrischen Strom in einem Reaktor oder von einer speziellen Elektrolysezelle kommen.

¹² [9]

¹³ [10]

¹⁴ [11]

4.3 Kraftstoffsynthese

Die Herstellung von E-Fuels erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird Wasserstoff per Elektrolyse mithilfe von erneuerbarem Strom aus Wasser gewonnen. Das benötigte CO₂ wird entweder aus der Luft oder aus industriellen Abgasen entnommen und in Kohlenmonoxid (CO) umgewandelt. Dieses CO wird dann mit Wasserstoff zu Synthesegas kombiniert, das als Basis für zwei Wege der E-Fuel-Produktion dient.

Durch die Fischer-Tropsch-Synthese wird aus dem Synthesegas sogenanntes Syncrude erzeugt, ein flüssiges Rohöl-ähnliches Produkt. Dieses Syncrude wird anschliessend weiter raffiniert, um E-Diesel und E-Benzin zu erzeugen, die in der bestehenden Tankinfrastruktur verwendet werden können.¹⁵

Alternativ lässt sich das Synthesegas durch die Methanolsynthese in Methanol umwandeln. Dieses Methanol kann direkt als Treibstoff genutzt und in bestehende Infrastrukturen integriert werden. Zudem dient es als Ausgangsstoff für die Produktion weiterer chemischer Verbindungen, wie etwa Polyoxymethylendimethylether (OME). In dieser Arbeit werde ich jedoch nicht weiter auf die Methanolsynthese eingehen.¹⁶

4.3.1 Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) ist ein bedeutender chemischer Prozess, der es ermöglicht, synthetische Kohlenwasserstoffe aus Synthesegas zu erzeugen. Dieser Prozess hat nicht nur eine lange Geschichte, sondern spielt auch eine entscheidende Rolle in der Entwicklung von E-Fuels, die als umweltfreundliche Alternativen zu fossilen Brennstoffen gelten.

4.3.1.1 Historischer Hintergrund

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) wurde in den 1920er Jahren von den deutschen Chemikern Franz Fischer und Hans Tropsch entwickelt. Sie erforschten die Umwandlung von Kohlenmonoxid und Wasserstoff in flüssige Kohlenwasserstoffe, was zunächst vor allem im Rahmen der chemischen Industrie von Bedeutung war. In den folgenden Jahrzehnten wurde die FTS besonders in Zeiten von Ölkrisen und Energieknappheit weiterentwickelt. Während des Zweiten Weltkriegs wurde die Synthese von Deutschland genutzt, um synthetische Kraftstoffe aus Kohle zu gewinnen, da die Zufuhr von Erdöl stark eingeschränkt war. Diese historische Nutzung zeigt, dass die Fischer-Tropsch-Synthese eine bedeutende Rolle in der Energieversorgung spielte, selbst in Krisenzeiten.¹⁷

¹⁵ [3]

¹⁶ [3]

¹⁷ [12]

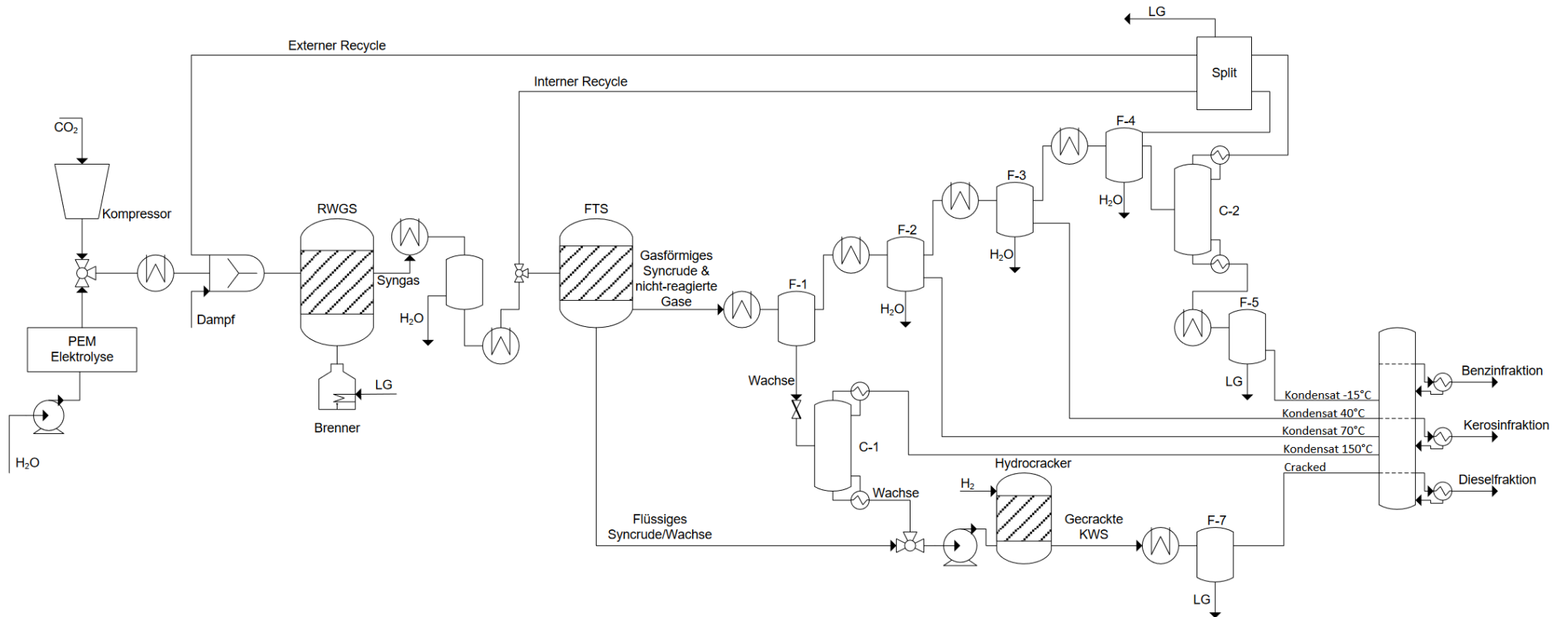


Abbildung 12: Prozessflussbild der E-Fuel produktion

4.3.1.2 Funktionsweise der Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) ist ein entscheidender Prozess zur Herstellung von E-Fuels, bei dem Synthesegas, bestehend aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), in synthetische Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird. In einem Reaktor reagieren diese Gase unter hohem Druck und erhöhter Temperatur in Gegenwart eines Katalysators, meist Eisen oder Kobalt. Während dieser chemischen Reaktionen entstehen Kohlenwasserstoffketten, die in unterschiedlichen Längen variieren und in verschiedene Kategorien eingeteilt werden können. Der Prozess verläuft in mehreren Schritten:

Zunächst erfolgt die Adsorption, bei der Kohlenmonoxid- und Wasserstoffmoleküle an der Oberfläche des Katalysators anhaften. Im nächsten Schritt, den Oberflächenreaktionen, werden die Kohlenmonoxidmoleküle durch Wasserstoff zu gesättigten Verbindungen umgewandelt, wodurch Kohlenwasserstoffketten entstehen. Diese Ketten können von linearen und verzweigten Alkanen bis hin zu Verbindungen mit Doppelbindungen oder sogar zu sauerstoffhaltigen Molekülen wie Alkoholen und Carbonsäuren reichen. Ein wichtiger Aspekt der Reaktion ist das Kettenwachstum, bei dem sich die Kohlenstoffatome miteinander verbinden, was als eine Art Polymerisation betrachtet werden kann. Wenn die Kettenbildung verzweigt verläuft, spricht man von Isomerisierung.¹⁸

Die entstehenden Kohlenwasserstoffe können kurzkettig, mittelkettig oder langkettig sein. Kurzkettige Kohlenwasserstoffe sind gasförmig, während mittelkettige Kohlenwasserstoffe, wie e-Benzin, bei Raumtemperatur flüssig sind und vor allem in herkömmlichen Ottomotoren Verwendung finden. Längere Kohlenwasserstoffe wie e-Kerosin und e-Diesel sind ebenfalls flüssig und kommen in der Luftfahrt sowie im Dieselmotorbereich zum Einsatz. Sehr lange Kohlenwasserstoffe bilden Wachs, das meist fest oder halb fest ist und in zahlreichen Anwendungen, von Kosmetik bis zur Kerzenherstellung, genutzt wird. Diese Wachsprodukte haben höhere Schmelzpunkte und sind bei Raumtemperatur fest oder halbfest.

Im Desorptionsschritt werden schliesslich die gebildeten Produkte, wie Wasser und Kohlenwasserstoffe, von der Katalysatoroberfläche gelöst. Dieser Vorgang, auch als Kettenabbruch bezeichnet, erfolgt abhängig von Druck und Temperatur und kann durch verschiedene Mechanismen ausgelöst werden, etwa durch Dehydrierung oder unvollständige Hydrierung der Kohlenstoffatome.¹⁹

Am Ende des Prozesses entsteht Syncrude, ein synthetisches Rohöl, das in seiner chemischen Zusammensetzung dem konventionellen Rohöl ähnelt. Dieses Syncrude kann dann in bestehenden Raffinerien weiterverarbeitet werden, um verschiedene E-Fuels wie synthetischen Diesel (E-Diesel), Kerosin (E-Kerosin) und Benzin (E-Benzin) zu erzeugen. Es ist wichtig zu betonen, dass die FTS nicht ausschliesslich ein einzelnes Produkt wie E-Diesel produziert, sondern eine Mischung aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, deren Anteile je nach Prozessdesign und Betriebsbedingungen variieren. Während sich die Produktverhältnisse während der Synthese steuern lassen, entsteht stets eine Produktpalette, die neben Diesel und Benzin auch andere Kohlenwasserstoffe umfasst, die je nach Bedarf weiterverarbeitet oder genutzt werden können.²⁰

	Gase	Benzin	Kerosin	Diesel	Wachse
C-Atome	C1-C4	C5-C9	C8-C16	C12-C20	C20+

Abbildung 13: Einteilung der Produktfraktionen

¹⁸ [13]

¹⁹ [13]

²⁰ [13]

5 E-Fuel Produktion und Nutzung

5.1 Wo werden Diese E-Fuels produziert?

Es gibt heute diverse Standorte für die Forschung und Produktion von E-Fuel. Für diese Diplomarbeit habe ich zwei Projekte ausgewählt: «Haru Oni» und «Synhelion»

5.1.1 Pilotprojekt der Automarke Porsche in Patagonien «Haru Oni»

Die Porsche E-Fuel-Anlage in Patagonien, Chile, ist Teil eines zukunftsweisenden Projekts zur Herstellung klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe. Die Region um Punta Arenas bietet nahezu ideale Bedingungen für die Produktion von E-Fuels. Dank der konstanten Windverhältnisse, die an rund 270 Tagen im Jahr optimale Windkraftnutzung ermöglichen, können die Windräder fast durchgehend unter Volllast betrieben werden. Der dabei erzeugte Strom wird für die Elektrolyse verwendet, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Dieser Wasserstoff wird dann mit CO₂ aus der Luft kombiniert, um synthetische Kraftstoffe herzustellen, die sich in bestehenden Verbrennungsmotoren verwenden lassen.

Die Produktionsstätte „Haru Oni“, die von Porsche in Zusammenarbeit mit Siemens Energy und weiteren Partnern betrieben wird, begann in ihrer ersten Phase mit einer Jahresproduktion von 130.000 Litern. Langfristig soll die Kapazität jedoch auf 550 Millionen Liter jährlich erhöht werden.²¹



Abbildung 14: Vogelperspektive Produktionsstätte in Patagonien "Haru Oni"

²¹ [14]

5.1.2 Pilotprojekt der ETH Zürich «Synhelion»

Synhelion ist ein innovatives Unternehmen, das sich auf die Produktion von Solartreibstoffen für nachhaltige Mobilität spezialisiert hat. Die Idee zu Synhelion entstand an der ETH Zürich, ausgehend von der Vision, die Verbrennung chemisch umkehren zu können. Diese Idee durchlief erfolgreiche Tests auf Papier, im Labor und schliesslich im Feld. 2016 wurde Synhelion gegründet, um diese Vision in die Praxis umzusetzen und Solartreibstoffe auf den Markt zu bringen. Synhelions Produkte – solarer Flugzeugtreibstoff, Diesel und Benzin – können fossile Brennstoffe direkt ersetzen und dabei den CO₂-Kreislauf schliessen, da bei ihrer Verbrennung nur so viel CO₂ freigesetzt wird, wie zuvor zur Herstellung verwendet wurde.²²

5.1.2.1 Herstellungstechnologie

Synhelion nutzt die Sun-to-Liquid-Technologie, einen thermochemischen Prozess, der Solarenergie verwendet, um CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren, insbesondere im Langstreckenverkehr und in Anwendungen, die schwer elektrifizierbar sind. Diese Technologie basiert auf der kostengünstigen und global verfügbaren Solarenergie, was eine weltweite Skalierung ermöglicht.

Im Zentrum des Produktionsprozesses steht ein Spiegelfeld, das Sonnenlicht auf einen Sonnenempfänger an der Spitze eines Turms bündelt. Das konzentrierte Sonnenlicht erhitzt eine spezielle Wärmeübertragungsflüssigkeit (HTF) auf bis zu 1.500°C. Diese gasförmige HTF, bestehend aus CO₂ und H₂O, zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf und fungiert als idealer Träger für Hochtemperatur-Solarprozesswärme. Diese Prozesswärme wird genutzt, um das Synthesegas zu erzeugen.

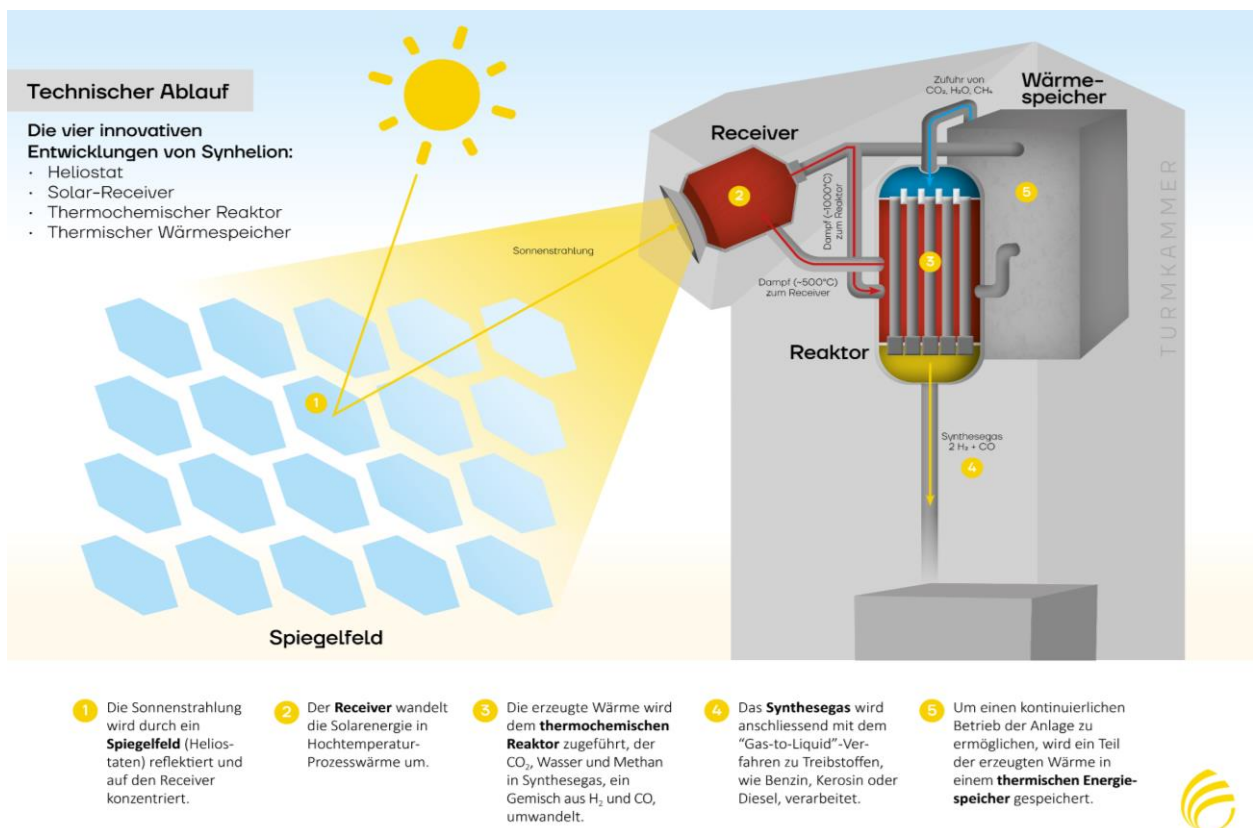


Abbildung 15: Technischer Ablauf der Anlage

Das Synthesegas wird anschliessend in einem weiteren Schritt in der Fischer-Tropsch-Synthese verarbeitet, um Syncrude zu produzieren, ein synthetisches Rohöl. Syncrude kann dann weiter verfeinert werden, um erneuerbare Treibstoffe wie Diesel, Benzin und Kerosin zu erzeugen und die fossilen Brennstoffe direkt ersetzen. Zusätzlich ist die Solaranlage mit einem thermischen Energiespeichersystem (TES) ausgestattet, das einen durchgehenden Betrieb rund um die Uhr ermöglicht, auch wenn die Sonne nicht scheint.²³

5.1.2.2 Produktionsstandorte und Kapazität

DAWN (Deutschland):

Im Juni 2024 eröffnete Synhelion seine erste industrielle Demonstrationsanlage „DAWN“ in Jülich, Deutschland. Diese Anlage demonstriert die Robustheit der Sun-to-Liquid-Technologie und wird die ersten Treibstoffchargen für Showcases in verschiedenen Verkehrssektoren produzieren.

RISE (Spanien):

Die erste kommerzielle Produktionsanlage, „RISE“, wird in Spanien gebaut und soll ab 2027 in Betrieb gehen. RISE wird die Sun-to-Liquid-Technologie auf kommerzieller Ebene umsetzen und die Herstellung erneuerbarer Treibstoffe weiter skalieren.

Was angestrebt wird:

Synhelion plant eine schnelle Skalierung seiner Technologie und Produktionskapazität. Bis 2033 sollen die Produktionskosten auf etwa 1 EUR/CHF/USD pro Liter sinken, bei einer jährlichen Produktionskapazität von einer Million Tonnen Treibstoff. Bis 2040 will Synhelion die Kapazität so weit steigern, dass etwa die Hälfte des europäischen Bedarfs an Sustainable Aviation Fuel (SAF) gedeckt werden kann. Das langfristige Ziel von Synhelion ist es, eine nachhaltige und vernetzte Welt zu schaffen, in der Menschen umweltfreundlich reisen und die globale Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen überwinden können.²⁴



Abbildung 16: Produktionsstätte DAWN in Jülich (D)

²³ [18]

²⁴ [17]

5.2 Transport- und Lagerfähigkeit von E-Fuels

E-Fuels zeichnen sich durch eine hervorragende Transport- und Lagerfähigkeit aus. Ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften sind den fossilen Brennstoffen sehr ähnlich. Dies ermöglicht es, sie problemlos in bestehender Infrastruktur zu bewegen und aufzubewahren. Pipelines, Tankwagen und Lagertanks, die für Diesel und Benzin genutzt werden, können auch für E-Fuels verwendet werden. Die Dichte und Viskosität der E-Fuels entsprechen nahezu denen herkömmlicher Kraftstoffe. Dadurch kann die vorhandene Transporttechnik weiterhin eingesetzt werden, ohne dass teure Anpassungen oder zusätzliche Sicherheitsmassnahmen erforderlich sind.

Die Lagerung von E-Fuels ist ebenfalls unkompliziert. Sie können in den gleichen Tanks und Speichern wie fossile Brennstoffe aufbewahrt werden. Es sind keine besonderen Anforderungen an Temperatur oder Druck nötig, was die Handhabung erheblich erleichtert. E-Fuels bleiben stabil und können über längere Zeiträume sicher gelagert werden. Diese Kompatibilität mit bestehenden Lagereinrichtungen führt zu einer Reduzierung der Investitionskosten und des Aufwands für neue Systeme.²⁵

5.3 Drop-in-Fähigkeit der E-Fuels

Ein weiterer entscheidender Vorteil von E-Fuels ist ihre sogenannte Drop-in-Fähigkeit. Diese Eigenschaft ermöglicht es, fossile Kraftstoffe direkt zu ersetzen, ohne dass technische Änderungen an Motoren oder der Infrastruktur erforderlich sind. E-Fuels können in Verbrennungsmotoren genauso eingesetzt werden wie Diesel oder Benzin. Fahrzeuge, Maschinen und Anlagen, die für fossile Kraftstoffe ausgelegt sind, können ohne Anpassungen auf E-Fuels umgestellt werden. Dies macht den Übergang zu nachhaltigeren Energieformen schnell und effizient.

Die Drop-in-Fähigkeit ist besonders in Sektoren wie der Luftfahrt und dem Schwerlastverkehr von Bedeutung. In diesen Bereichen sind elektrische Alternativen oft schwierig umzusetzen oder mit hohen Kosten verbunden. E-Fuels bieten hier eine praktikable Lösung, um den CO₂-Ausstoss zu reduzieren und gleichzeitig die bestehenden Systeme weiter zu nutzen.

Um die Drop-in-Fähigkeit zu gewährleisten, müssen E-Fuels den chemischen Aufbau fossiler Brennstoffe genau nachahmen. Für E-Fuel-Benzin ist es wichtig, dass die Oktanzahl mit der von herkömmlichem Benzin vergleichbar ist. Dies garantiert eine ausreichende Klopfestigkeit und sorgt dafür, dass die Motoren effizient und ohne Schäden arbeiten. Für E-Fuel-Diesel ist die Cetanzahl entscheidend, da sie die Zündwilligkeit optimiert. Zudem müssen die Viskosität und die thermische Stabilität den Anforderungen moderner Motoren entsprechen, um einen reibungslosen Verbrennungsprozess zu gewährleisten.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die Additive, die für den Schutz der Motoren und zur Leistungsoptimierung eingesetzt werden, mit den bestehenden Kraftstoffen kompatibel sein müssen.²⁶

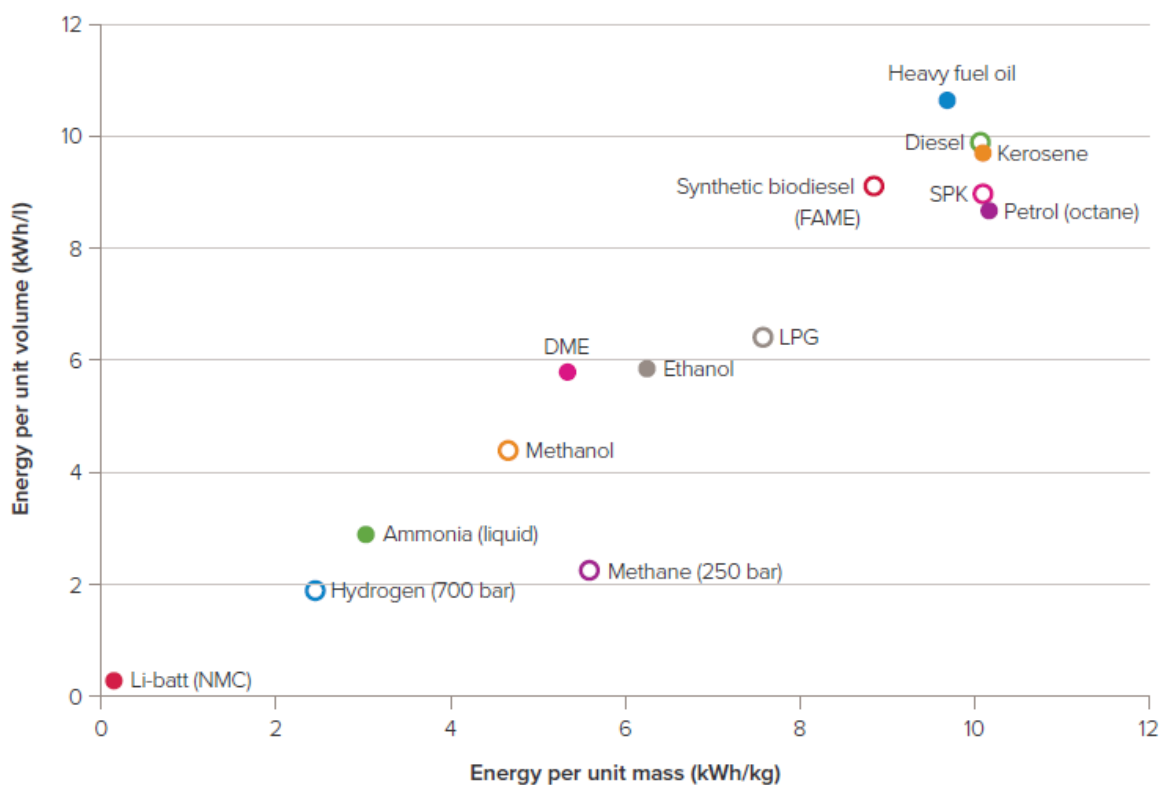
²⁵ [20]

²⁶ [21]

5.3.1 Energiedichte verschiedener Energieträger im Vergleich

Flüssige Kraftstoffe wie Benzin, Diesel und Kerosin weisen im Vergleich zu anderen Energieträgern eine besonders hohe Energiedichte auf. Zudem sind sie unter Raumdruck und Raumtemperatur lagerbar. Damit ist auch der Transport flüssiger Energieträger technisch einfach machbar, was ein deutlicher Vorteil gegenüber Energieträgern in anderer Form ist. Aufgrund der gleichen chemischen Zusammensetzung gelten all diese Vorteile auch für E-Fuels-Produkte.²⁷

Specific energy and energy density of a range of fuel options, taking into account typical tank weights (lower heating value).



SPK Synthetic Paraffinic Kerosene; Li-batt(NMC) Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery; LPG Liquid Petroleum Gas; DME Dimethyl Ether, FAME Fatty Acid Methyl Esters

Abbildung 17: Tabelle Energiedichte der Energieträger

²⁷ [20]

Zusammensetzung Stoffgruppen Superbenzin DIN EN 228 und Diesel DIN EN 590

Superbenzin DIN EN 228

- **Alkane:**
Sie hiessen früher Paraffine. Es sind einfach gesättigte Kohlenwasserstoffe, bei denen keine Mehrfachbindungen zwischen den Atomen auftreten.
- **Aromaten:**
bis zu 42 Volumenprozent
- **Alkene:**
bei Super Plus - bis zu 21 Volumenprozent
- **Benzol:**
bis zu 1 Volumenprozent
- **Schwefel:**
max. 150 mg/kg
- **Sauerstoff:**
max. 2,7 Masseprozent

Die restlichen Volumenprozent bestehen aus **Methyl-tert-butylether** (MTBE, Ether), einer farblosen, leicht flüchtigen Flüssigkeit, sowie Additiven. Additive werden extra hergestellt und in der Raffinerie beigemischt.²⁸

Diesel DIN EN 590

- **Alkane:**
- **Cycloalkane:**
das sind ringförmige, gesättigte Kohlenwasserstoffe, eine Untergruppe der Alkane.
- **Aromatische Kohlenwasserstoffe:**
Kohlenwasserstoffe, energetisch günstig und chemisch sehr stabil.
- **Additive:**
Zusatzstoffe, um bestimmte Eigenschaften wie Zündwilligkeit, Zündbeschleunigung oder Schmierung zu verbessern.
- **Schwefelgehalt:**
max. 10 mg/kg.
- **Biodiesel:**
Max. 7%²⁹

Damit die Cetanzahl verbessert wird, kommen je nach Kraftstoff oftmals die giftigen Stoffe Tetranitromethan, Amylnitrat oder Acetonperoxid hinzu.³⁰

²⁸ [15]

²⁹ [16]

³⁰ [15]

5.4 Wirtschaftlichkeit und Herausforderung von E-Fuels

5.4.1 E-Fuel-Kosten

Die aktuellen Kosten für E-Fuels liegen bei etwa 4,50 €/Liter Dieseläquivalent. Diese Preise hängen vor allem von den Kosten für nachhaltigen Strom ab. Bislang gibt es keine industriellen Grossanlagen zur Produktion, aber es wurden mehrere Studien zu den zukünftigen E-Fuel-Kosten veröffentlicht. Diese Studien basieren auf Prognosen.

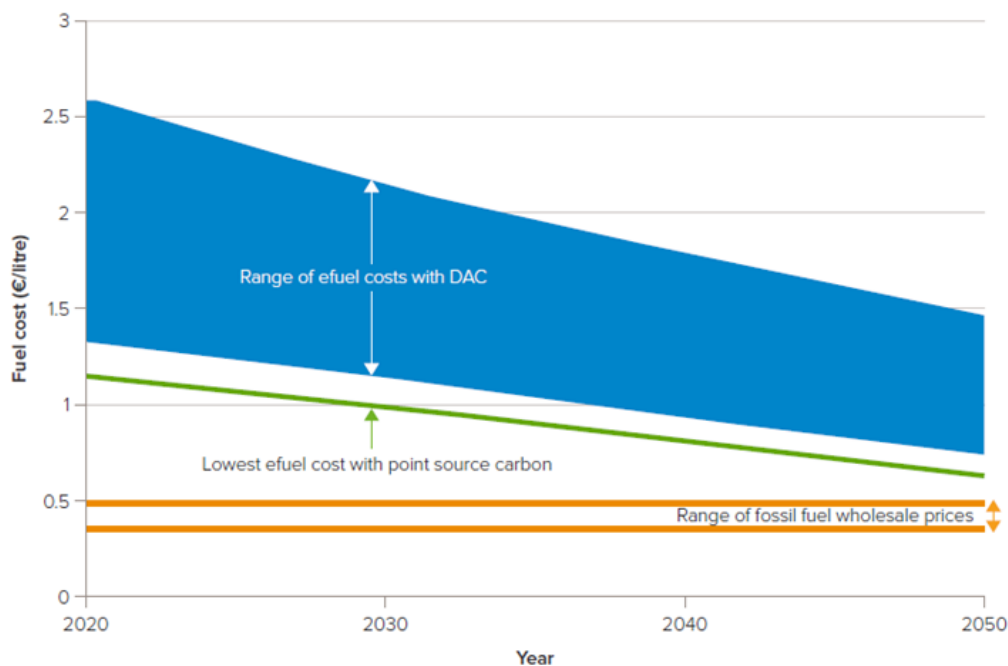
Es zeigen sich erhebliche Unterschiede in diesen Prognosen. Diese Unterschiede ergeben sich aus Schwankungen bei den Strompreisen, Betriebszeiten, Elektrolyseurkosten, der Herkunft des Kohlendioxids und den verwendeten Kapitalzinssätzen. Beispielsweise variieren die Preise für erneuerbare Energien im Jahr 2050. Solarenergie in Nordafrika könnte etwa 25 €/MWh kosten, während Windenergie in Europa bei etwa 50 €/MWh liegt.

Auf Grundlage dieser Prognosen wurde Abbildung 18 erstellt. Sie zeigt die zukünftige Preisspanne von E-Fuels, basierend auf einer einheitlichen Preissetzung und einem Zinssatz von 6 %.

Die Hauptfaktoren für die prognostizierte Kostenreduktion sind in Abbildung 19 dargestellt. Fast die gesamte Reduktion der Kapitalkosten resultiert aus der Elektrolyse. Dies wird in Abbildung 20 näher erläutert. Es ist wichtig zu beachten, dass die Betriebs- und Wartungskosten (O&M) von den Kapitalkosten abhängen.³¹

32

Efuel cost forecasts.



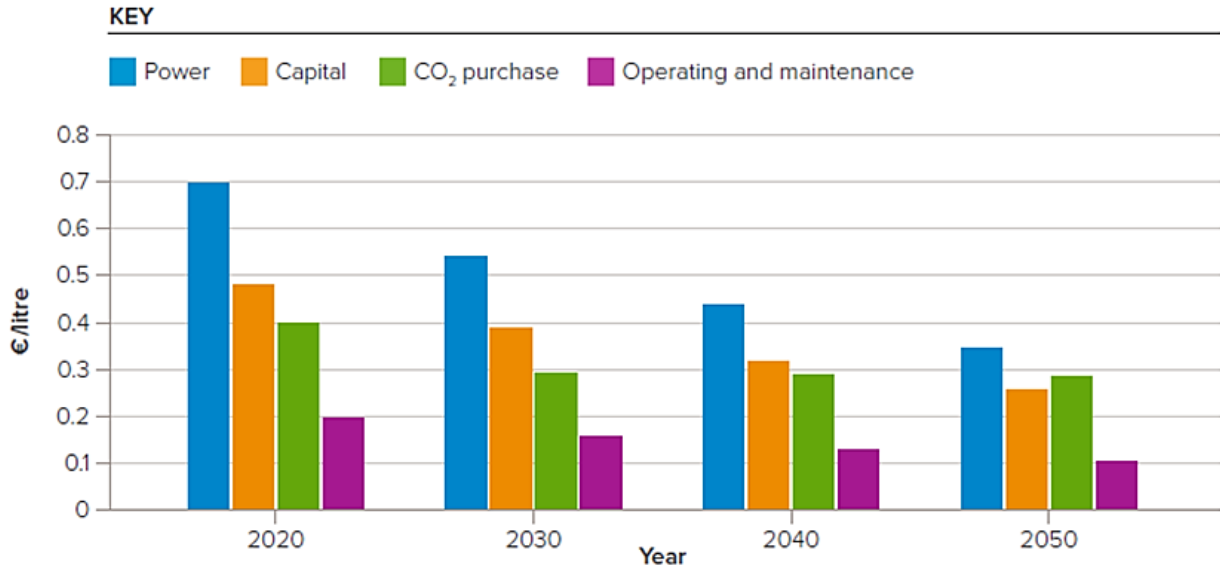
Basierend auf 3 Technologieoptionen für Diesel unter Verwendung von Direct Air Capture, einem Zinssatz von 6 %, einer Projektlaufzeit von 25 Jahren sowie der Nutzung von Solarenergie (2344 Stunden/Jahr) und Windenergie (3942 Stunden/Jahr).

Abbildung 18: Tabelle Treibstoffkosten pro Liter in Euro und Jahr

³¹ [22]

³² [22]

Contributions to the total efuel cost⁸³.



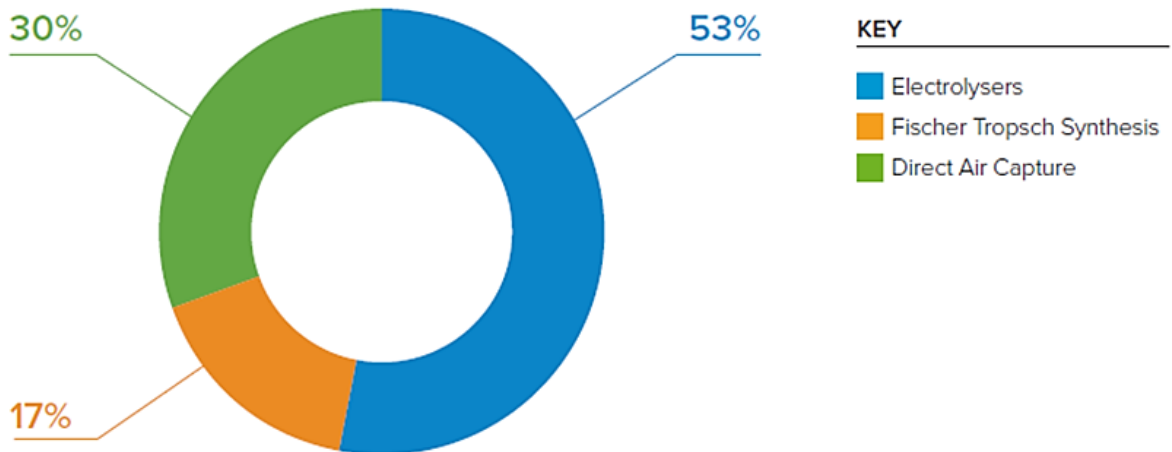
Basierend auf einem Zinssatz von 6 %, einer Projektlaufzeit von 25 Jahren, dem Erneuern der Anlagen nach 15 Jahren und der Nutzung von Solarenergie (2344 Stunden Vollast pro Jahr).

Abbildung 19: Beiträge zu den Gesamtkosten von E-Fuel

33

34

Distribution of capital cost of efuels⁸⁴.



Hinweis: Basierend auf einem Zinssatz von 6 %, einer Projektlaufzeit von 25 Jahren, Direct Air Capture durch Temperature Swing Absorption (TSA) und der Nutzung von Solarenergie (Kapazitätsfaktor nicht in der Kapitalabschätzung des Elektrolyseurs berücksichtigt).

Abbildung 20: Verteilung der Kapitalkosten von E-Fuel

³³ [22]

³⁴ [22]

5.4.2 Kosten für CO₂-Abscheidung

Die Kosten für die CO₂-Abscheidung hängen von der Konzentration und Reinheit der CO₂-Quelle ab. Wenn ein reiner CO₂-Strom aus einem industriellen Prozess, wie einer Fermentationsanlage, verfügbar ist, sind die Abscheidungskosten niedrig. Diese liegen bei etwa 10 €/Tonne. Die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft, wo die Konzentration sehr gering ist, ist teurer. Beispiele für Projekte in diesem Bereich sind Carbon Engineering und ClimeWorks. Die Kapitalkosten solcher Anlagen im grossen Massstab sind derzeit schwer abzuschätzen, da bisher nur kleinere Einheiten gebaut wurden.³⁵

5.4.3 Kosten der Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Umwandlungstechnologie ist auf grossem Massstab gut entwickelt. Anlagen für synthetische Kraftstoffe, insbesondere solche auf Biomassebasis, sind tendenziell kleiner als bestehende kommerzielle Anlagen. Dies führt dazu, dass die Kapitalkosten pro Leistungseinheit steigen, da Skaleneffekte verloren gehen. Insgesamt liegen die Kapitalkosten für eine Fischer-Tropsch-Synthese-Einheit bei etwa 30.000 bis 40.000 €/Fass Öläquivalent pro Tag. Bei einer vergleichbaren E-Fuel-Anlage betragen die Kapitalkosten etwa 200.000 €/Fass Öläquivalent pro Tag, basierend auf Elektrolyseurkosten von 1.000 €/kW (elektrisch).

Die absoluten Kapitalkosten für E-Fuels sind erheblich. Für 2050 werden die Investitionskosten auf 200.000 bis 400.000 €/Fass pro Tag geschätzt. Das bedeutet, dass eine Anlage mit einer Kapazität von 100.000 Fass pro Tag eine Kapitalinvestition von 20 bis 40 Milliarden Euro erfordern würde. Der Kerosinbedarf allein in Europa wird bis 2040 auf etwa 1,4 Millionen Fass pro Tag geschätzt. Dies würde Investitionen in Konversionsanlagen von 280 bis 560 Milliarden Euro erfordern, falls der gesamte Bedarf durch E-Fuels gedeckt werden soll.

Zusätzlich wird der Bedarf an nachhaltigem Strom zur Herstellung von E-Fuel für die europäische Luftfahrt zwischen 1.400 und 2.100 TWh pro Jahr liegen. Zum Vergleich: Im Jahr 2016 betrug die gesamte Stromerzeugung in der EU etwa 3.000 TWh, wobei 51% aus nachhaltigen Quellen stammten.

Ohne weitere Entwicklungen und Skalierung ist es unwahrscheinlich, dass E-Fuels im Zeitraum bis 2030 ohne staatliche Unterstützung wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein werden. Es gibt jedoch kommerzielle Projekte, die auf deutlich niedrigere Preise abzielen. Ein Beispiel ist die Sunfire E-Fuel-Anlage in Herøya, Norwegen, die einen Preis von 2 €/Liter anstrebt.³⁶

³⁵ [22]

³⁶ [22]

5.4.4 Effizienz und Energiebedarf der Eingangsenergie

Abbildung 21 veranschaulicht die gesamte Energieeffizienz bei der Nutzung erneuerbarer Elektrizität zur Energieversorgung von Fahrzeugen. Dabei werden drei Antriebsarten verglichen: Elektromotor, Brennstoffzelle mit Elektromotor und Verbrennungsmotor. Die Verluste entstehen durch die Energieübertragung und -umwandlung, beispielsweise von elektrischer in chemische Energie. Es zeigt sich, dass die Effizienz von Power-to-E-Fuel-Diesel aufgrund der Energieverluste bei der Elektrolyse, der Synthese und im Verbrennungsmotor erheblich geringer ist.

Diese Ineffizienz führt dazu, dass etwa fünfmal mehr nachhaltiger Strom erzeugt werden müsste, um die Menge an E-Fuel-Diesel zu produzieren, die zur Bewegung eines Fahrzeugs erforderlich ist. Im Vergleich dazu benötigt dasselbe Fahrzeug mit einem Elektromotor deutlich weniger Energie. Aus diesem Grund wird erwartet, dass batterieelektrische Fahrzeuge dort dominieren, wo genügend Strom gespeichert und genutzt werden kann. Synthetische E-Fuels und Biokraftstoffe könnten hingegen in Transportbereichen wettbewerbsfähiger werden, in denen der Einsatz von Strom oder anderen Alternativen schwierig ist. Insbesondere wenn Forschung und Entwicklung dazu beitragen, die bestehenden Ineffizienzen zu verringern.³⁷

38

Waterfall chart of pathway efficiencies for low-carbon transport.

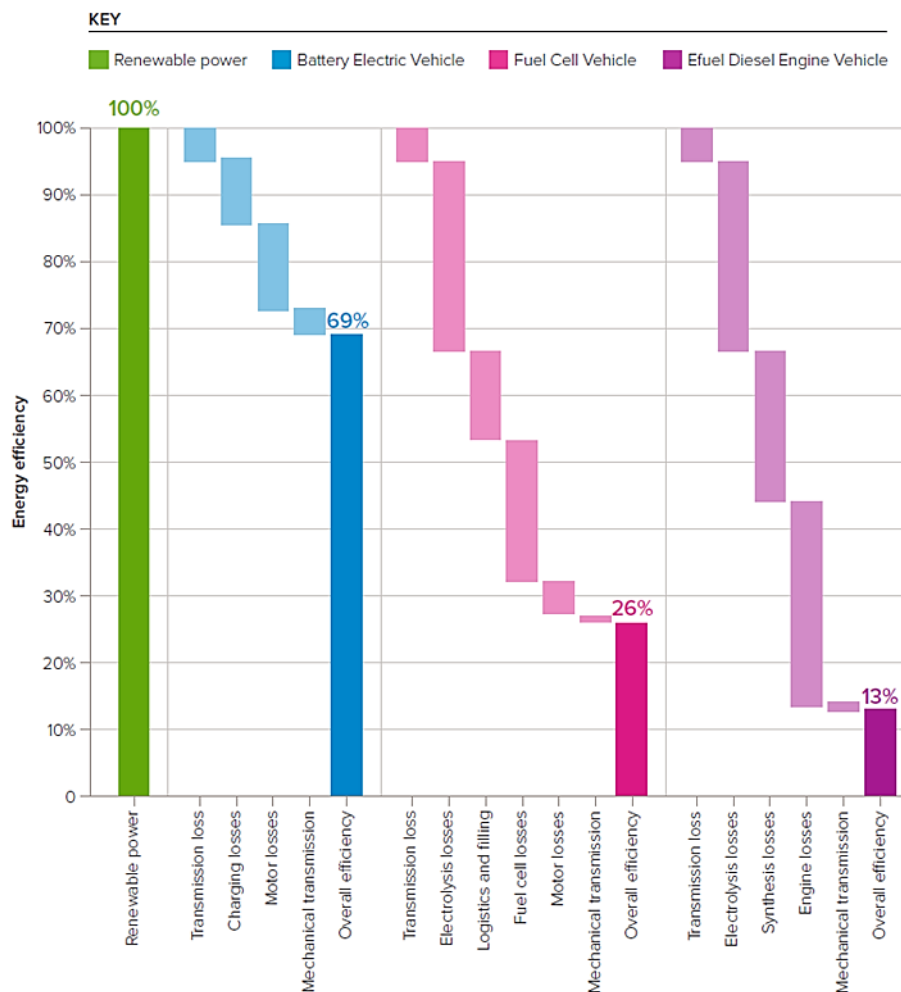


Abbildung 21: Wasserfall-Diagramm der Effizienzen verschiedener Antriebstechnologien

³⁷ [22]

³⁸ [22]

5.4.5 Potenzial für die Produktion im grossen Massstab

Die zahlreichen Verfahrensschritte zur Herstellung von Biokraftstoffen und E-Fuels sind bereits in der chemischen Industrie etabliert. Ähnliche Technologien werden in mehreren kommerziellen Gas-to-Liquid-Anlagen verwendet, um schwefelarmen Diesel aus Erdgas oder Kohle zu erzeugen. Ein Beispiel ist die Secunda-Anlage von Sasol in Südafrika, die rund 160.000 Fass pro Tag (etwa 7,9 Millionen Tonnen pro Jahr) produziert. Auch die Pearl GTL-Anlage von Shell in Katar hat eine Produktion von etwa 120.000 Fass pro Tag (ca. 5,9 Millionen Tonnen pro Jahr). Um E-Fuels herzustellen, wären jedoch erhebliche Modifikationen dieser Anlagen erforderlich.

Dimethylether (DME) wird heutzutage sowohl als Kraftstoffprodukt als auch als Zwischenprodukt in der chemischen Industrie in grossem Massstab hergestellt. Die Herstellung von Oxymethylenether (OME) im grossen Massstab ist dagegen noch nicht etabliert. OME dient beispielsweise als Additiv, um den Cetanwert von Diesel zu erhöhen. Bisher wurden nur zwei Anlagen mit einer Kapazität von über 100.000 Tonnen pro Jahr (ungefähr 1.200 Fass Öläquivalent pro Tag) errichtet, da die chemischen Prozesse komplex sind.

Die Skalierung der Produktion synthetischer Biokraftstoffe wird durch die Verfügbarkeit von ausreichenden Rohstoffen und die Skalierung der Vergaser-Technologie begrenzt.³⁹

5.4.6 Produktion von E-Fuels

Die grossflächige Produktion von E-Fuels wird derzeit durch mehrere Faktoren eingeschränkt. Dazu gehören die Verfügbarkeit von kostengünstigem nachhaltigem Strom zur Wasserstofferzeugung, die Skalierung der Elektrolyseure und die Erzeugung von Synthesegas. Es ist wahrscheinlich, dass Produktionszentren dort entstehen, wo diese Energiequellen reichlich vorhanden sind, wie beispielsweise Windenergie an der Westküste Afrikas und Solarenergie in Wüstenregionen. Dies gilt insbesondere, wenn die direkte Luftabscheidung von Kohlendioxid zum Einsatz kommt. E-Fuels werden daher voraussichtlich von diesen Produktionszentren weltweit exportiert.

Die zukünftige globale Nachfrage nach Kraftstoffen für die Luftfahrt und den Seeverkehr steigt aufgrund des kontinuierlichen Wachstums in diesen Sektoren, die für den internationalen Handel und den Personenverkehr von entscheidender Bedeutung sind. Mit der Zunahme des globalen Verkehrs, der steigenden Passagierzahlen und des Güterverkehrs wird der Bedarf an nachhaltigen Kraftstoffen, die die CO₂-Emissionen reduzieren, immer dringlicher. Daher zeigt sich ein erhebliches Marktpotenzial für synthetische flüssige Kraftstoffe, die als erster Schritt zur Dekarbonisierung und Defossilisierung gelten. Schätzungen zufolge müssten weltweit über 100 neue Produktionsanlagen im aktuellen kommerziellen Massstab für synthetische Kraftstoffe gebaut werden, um synthetische flüssige E-Fuels schrittweise einzuführen und fossile Energiequellen auszumustern.⁴⁰

5.4.7 Infrastrukturanforderungen

Sauerstoffhaltige Kraftstoffe können mit unterschiedlich umfangreichen Anpassungen der Infrastruktur genutzt werden. Bei Ethanol sind die Anpassungen minimal, während Dimethylether (DME) erhebliche Änderungen erfordert, da er eine Druckspeicherung benötigt. Zudem haben sauerstoffhaltige Kraftstoffe eine geringere Energiedichte, was die Effizienz der Infrastruktur auf der Energiebasis reduziert.

Im Vergleich dazu erfordert die Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen umfassende Infrastrukturänderungen und -kosten. Dazu zählen Wasserstoffpipelines, spezialisierte Lieferfahrzeuge und Elektrolyseeinheiten, die sich in der Nähe von Tankstellen befinden.⁴¹

³⁹ [22]

⁴⁰ [22]

⁴¹ [22]

5.4.8 Zusätzliche Produkte

Die Technologie zur Herstellung flüssiger synthetischer Kraftstoffe aus Kohlendioxid hat auch das Potenzial, Zwischenmoleküle für die chemische Industrie zu produzieren. Diese Moleküle sind wertvoller als die Kraftstoffe selbst und bieten zusätzliche Anreize für die Weiterentwicklung der Technologie.

Aktuelle Schätzungen zur zukünftigen weltweiten Nachfrage nach Luftfahrt- und Seeverkehrskraftstoffen in Millionen Tonnen pro Jahr:⁴²

43

	2030	2035	2040
Aviation	391	406	426
Marine	284	287	286
Total	675	693	712

Abbildung 22: Nachfrage an Treibstoff in Millionen Tonnen pro Jahr in Luftfahrt und Marine

⁴² [22]

⁴³ [22]

5.5 SWOT-Analyse

Diese SWOT-Analyse zeigt, dass E-Fuels grosses Potenzial bieten, insbesondere für schwer elektrifizierbare Bereiche, aber noch technologische und wirtschaftliche Hürden überwunden werden müssen, bevor sie sich als Massenzugang durchsetzen können.

Stärken (Strengths)

- **Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur:**
E-Fuels können in bestehenden Verbrennungsmotoren, Pipelines und Tankstellen verwendet werden, ohne dass grössere Änderungen an der Infrastruktur erforderlich sind.
- **Klimaneutralität (bei grüner Herstellung):**
E-Fuels können theoretisch klimaneutral sein, wenn sie mit erneuerbaren Energien produziert werden, da das dabei freigesetzte CO₂ bereits zuvor für die Herstellung entzogen wurde.
- **Vielfältige Anwendungen:**
E-Fuels können nicht nur in Autos, sondern auch in Flugzeugen, Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen verwendet werden, wo Elektrifizierung schwieriger umzusetzen ist.
- **Lager- und Transportfähigkeit:**
Im Gegensatz zu Elektrizität können E-Fuels relativ einfach gespeichert und transportiert werden, was sie flexibler in der Anwendung macht.
- **Weniger Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen:**
Der Einsatz von E-Fuels hilft, fossile Brennstoffe zu ersetzen und die Energiequellen vielfältiger zu gestalten.

Schwächen (Weaknesses)

- **Hohe Produktionskosten:**
Derzeit sind die Kosten für die Herstellung von E-Fuels sehr hoch, vor allem aufgrund der benötigten erneuerbaren Energie und der Elektrolyse-Technologie.
- **Effizienzverluste:**
E-Fuels weisen im Vergleich zu direkten elektrischen Lösungen wie Batterien eine geringere Energieeffizienz auf, da viel Energie bei der Umwandlung verloren geht.
- **Energieintensive Herstellung:**
Die Produktion von E-Fuels erfordert grosse Mengen an erneuerbarer Energie, die nicht immer ausreichend verfügbar ist.
- **Abhängigkeit von grünem Strom:**
Um klimaneutral zu sein, müssen E-Fuels aus erneuerbaren Energien stammen. Wenn fossile Brennstoffe für die Herstellung verwendet werden, fällt die CO₂-Bilanz negativ aus.
- **Langsame Marktentwicklung:**
Aufgrund der hohen Kosten und des Entwicklungsstands sind E-Fuels bisher nur in kleinen Mengen verfügbar, was eine grossflächige Einführung verzögert.

Chancen (Opportunities)

- **Förderung durch Politik:**
In einigen Regionen gibt es wachsende politische Unterstützung für E-Fuels, um alternative Kraftstoffe zu fördern und Klimaziele zu erreichen.
- **Dekarbonisierung schwerer Sektoren:**
E-Fuels könnten eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung von Sektoren spielen, die schwer zu elektrifizieren sind, wie die Luftfahrt, Schifffahrt und der Schwerlastverkehr.
- **Technologische Fortschritte:**
Mit zunehmenden technologischen Entwicklungen könnten die Produktionskosten sinken und die Effizienz verbessert werden, was E-Fuels wirtschaftlich konkurrenzfähiger machen könnte.
- **Globales Exportpotenzial:**
Länder mit viel erneuerbarer Energie könnten durch die Herstellung und den Export von E-Fuels wirtschaftlich profitieren.
- **Vielfältigere Energieversorgung:**
E-Fuels können dazu beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und von schwankenden Märkten zu verringern, insbesondere in Ländern, die keine umfassende Strominfrastruktur haben.

Risiken (Threats)

- **Wettbewerb durch Batterietechnologien:**
Die zunehmende Verbreitung und Effizienz von Elektrofahrzeugen und Batterietechnologien könnte E-Fuels verdrängen, da elektrische Lösungen häufig kostengünstiger und effizienter sind.
- **Verzögerte technologische Entwicklung:**
Wenn die Forschung und Entwicklung langsamer voranschreiten als erwartet, könnten E-Fuels gegenüber anderen Technologien ins Hintertreffen geraten.
- **Kritik an Effizienz:**
Da der Wirkungsgrad von E-Fuels im Vergleich zu direkten elektrischen Anwendungen gering ist, könnte dies zu einer mangelnden Akzeptanz führen, vor allem wenn es effizientere Alternativen gibt.
- **Abhängigkeit von erneuerbaren Energien:**
In Regionen mit begrenzter Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien könnte die Herstellung von E-Fuels schwierig sein und den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Folge haben.
- **Politische Unsicherheiten:**
Änderungen in politischen Rahmenbedingungen oder der Rückzug von Förderungen könnten die Entwicklung und den Markt für E-Fuels stark beeinträchtigen.

5.6 Zukunft Aussichten

5.6.1 Globale Energiepotenziale nutzbar machen:

Der Anteil erneuerbarer Energien an der globalen Stromproduktion wächst. Im Jahr 2019 lag dieser Anteil bei 23,2 %. Laut der Internationalen Energieagentur müssen erneuerbare Energien bis 2030 mehr als 60 % des Strombedarfs decken. Dieses Ziel ist wichtig, um bis 2050 „Netto-Null-Emissionen“ zu erreichen.

Das bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen stark gesenkt werden müssen. Fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl und Gas müssen ersetzt werden. Eine globale Strategie ist erforderlich. Viele Länder haben ideale Standorte für erneuerbare Energien. In Norwegen gibt es Wasserkraft. In Chile wird Windenergie genutzt. In der Sahara ist die Solarenergie sehr effektiv.

Die Potenziale für erneuerbare Energien sind weltweit gross. Diese Energien können in Form von E-Fuels gespeichert werden. Die Nutzung dieser Energien fördert den Technologietransfer. Es entstehen neue Investitionen und wirtschaftliche Chancen. Studien zeigen, dass der Einsatz von E-Fuels bis zu 278.700 neue Arbeitsplätze schaffen könnte. Davon wären 18.900 Arbeitsplätze direkt in der Produktion. Die restlichen 259.800 Arbeitsplätze würden indirekt bei Zulieferern entstehen.

Viele Länder könnten von dieser Entwicklung profitieren. Dazu zählen viele afrikanische Länder und der Nahe Osten. Auch grosse Teile Mittel- und Südamerikas sind betroffen. Länder in Asien, Australien und Ozeanien sind ebenfalls wichtig. Wirtschaftlich schwächere Länder könnten besonders profitieren. Viele dieser Länder exportieren derzeit fossile Brennstoffe. Eine Studie aus Marokko zeigt, dass jeder Euro, der in E-Fuels investiert wird, zusätzliche 12 Euro an wirtschaftlicher Wertschöpfung generiert.⁴⁴



Abbildung 23: Erforderliche Fläche zur Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs im Jahr 2018

⁴⁴ [23]

5.6.2 Effizienzunterschiede werden ausgeglichen

In den sonnigsten Regionen Deutschlands, wie Freiburg, scheint die Sonne im Durchschnitt 1.700 Stunden pro Jahr. In der Sahara hingegen sind es 4.300 Stunden. Ein Windrad in Chile hat etwa viermal so viele Volllaststunden wie ein vergleichbares in Deutschland.

Für die Herstellung von E-Fuels wird mehr Energie benötigt als für direkte elektrische Anwendungen. Diese höhere Energieausbeute an günstigen Standorten kompensiert jedoch diesen Bedarf. Dadurch gleichen sich die Effizienzunterschiede in der Herstellung im Vergleich zur direkten Elektrifizierung aus.

Es ist wichtig zu beachten, dass erneuerbarer Strom aus Patagonien oder Nordafrika nur durch die Umwandlung in „transportable“ Moleküle importiert werden kann.⁴⁵



Abbildung 24: Karte: Export der Technologie, Import der Energie

⁴⁵ [23]

5.6.3 Kraftstoffkosten und Ausblick

Eine Einschätzung auf die Kraftstoffkosten von der Website der eFuel Alliance zeigt, dass E-Fuels bereits intensiv erforscht wurden und die technologische Expertise für einen erfolgreichen Markteintritt vorhanden ist. Allerdings fehlen noch die notwendigen politischen Rahmenbedingungen, um eine industrielle Produktion im grossen Massstab zu ermöglichen. Hierzu zählen unter anderem eine CO₂-basierte Besteuerung von Kraftstoffen und die Anerkennung von E-Fuels als klimaneutraler Kraftstoff im Strassenverkehr. Wenn die richtigen Markt- und Produktionsbedingungen geschaffen werden, könnte die Produktion von E-Fuels bereits 2025 beginnen. Ein schrittweiser Ausbau der Produktion und Nutzung könnte bis 2050 zu einer vollständigen Ablösung herkömmlicher Kraftstoffe zugunsten klimaneutraler Alternativen führen.

Mit einer schrittweisen Erhöhung des E-Fuel-Anteils und sinkenden Produktionskosten durch den Ausbau der Produktionskapazitäten würden E-Fuels für Endverbraucher in jeder Phase des Hochlaufs erschwinglich bleiben. So werden die Produktionskosten für einen Liter E-Fuel im Jahr 2025 bei einem 4-prozentigen Anteil in herkömmlichen Kraftstoffen auf schätzungsweise 1,61 bis 1,99 Euro pro Liter taxiert. Bis 2050 könnten die Kosten bei einem E-Fuel-Anteil von 100 % auf 0,70 bis 1,33 Euro pro Liter sinken.

Für Verbraucher bedeutet dies, dass Diesel mit einem E-Fuel-Anteil im Jahr 2025 an Tankstellen etwa 1,22 Euro pro Liter kosten wird. Bis 2050 könnte der Preis für 100 % E-Diesel, berechnet nach heutigem Steuersatz, zwischen 1,38 und 2,17 Euro liegen. Für Benzin wird der Preis mit E-Fuel-Anteil im Jahr 2025 voraussichtlich zwischen 1,34 und 1,36 Euro betragen, und im Jahr 2050 könnten die Kosten für E-Benzin zwischen 1,45 und 2,24 Euro liegen. Somit bleibt klimaneutrales Fahren für die Allgemeinheit bezahlbar.⁴⁶

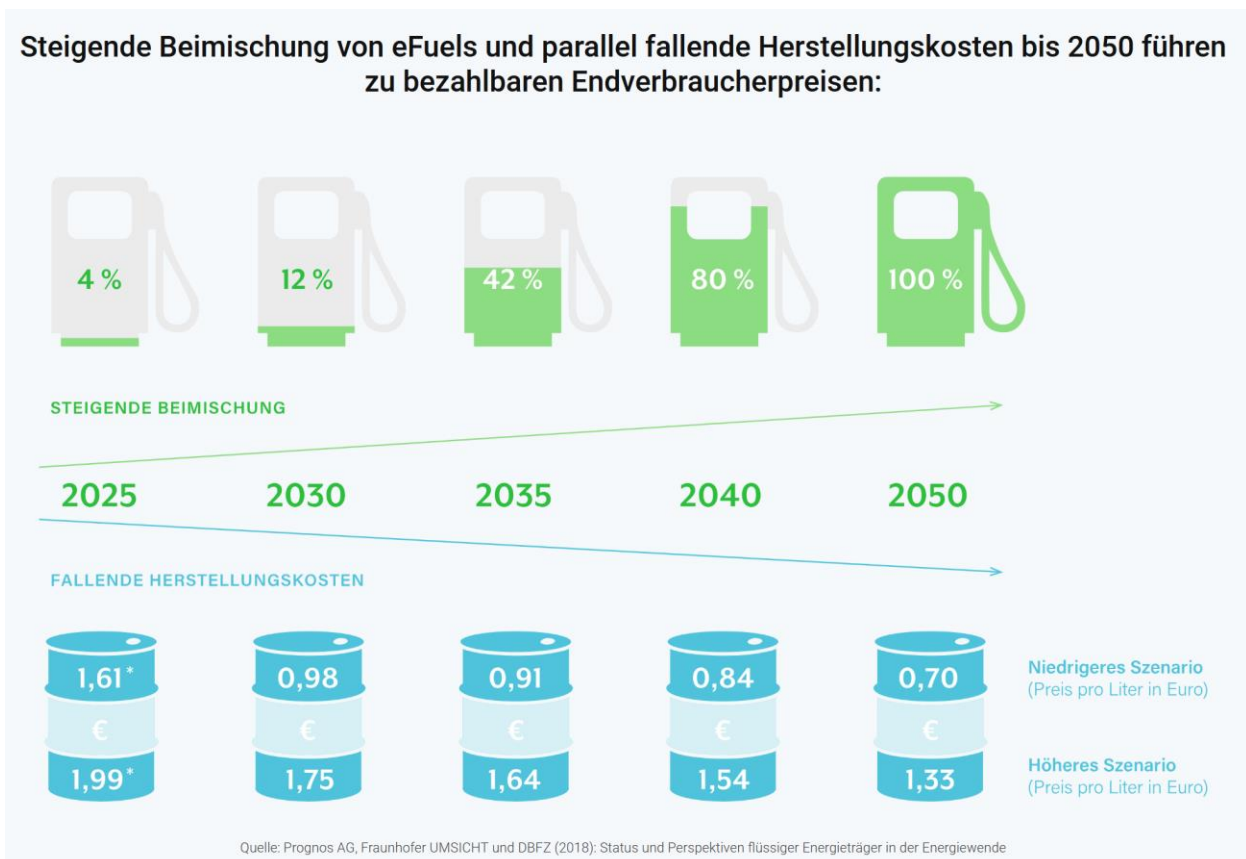


Abbildung 25: E-Fuel Beimischung in den Treibstoffen von Fossiler Herkunft

⁴⁶ [25]

Preisentwicklung für Kraftstoffe an der Tankstelle: Stets bezahlbare Preise für die Endverbraucher

1 Niedrigeres Szenario (Preis pro Liter in Euro)

Jahr	Diesel	Super
2025	1,21	1,34
2030	1,24	1,36
2035	1,36	1,46
2040	1,50	1,59
2050	1,38	1,45

2 Höheres Szenario (Preis pro Liter in Euro)

Jahr	Diesel	Super
2025	1,22	1,36
2030	1,36	1,48
2035	1,75	1,85
2040	2,19	2,28
2050	2,17	2,24

Quelle: Prognos AG, Fraunhofer UMSICHT und DBFZ (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende

Abbildung 26: Preisentwicklung an Tankstelle

Trotz der vielversprechenden Perspektiven gibt es bisher keine industriellen E-Fuel-Produktionsanlagen. Die Technologie sowie die benötigten Anlagenkomponenten sind jedoch umfassend erforscht. Die ersten Produktionsanlagen mit einer Kapazität von über 500 Millionen Litern pro Jahr sollen 2026 in Betrieb gehen. Parallel dazu wurden weltweit Wasserstoffprojekte mit einer installierten Kapazität von 214 GW angekündigt, die ebenfalls die Grundlage für E-Fuels schaffen könnten. Um einen sofortigen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und die Markteinführung von E-Fuels zu fördern, setzen sich unsere politischen Vorschläge für die sofortige Skalierung aller nachhaltigen Energieträger ein, darunter auch Biokraftstoffe. Diese Biokraftstoffe stammen aus einem stetig wachsenden, innovativen Pool nachhaltiger Rohstoffe, die den Nachhaltigkeitskriterien der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED) entsprechen und so den Weg zu einer klimaneutralen Zukunft bereiten.⁴⁷

⁴⁷ [25]

6 Projektabschluss

6.1 Meine Meinung zu E-Fuels

E-Fuels bieten eine chancenreiche Alternative für den CO₂-neutralen Betrieb von Verbrennungsmotoren. Sie sind besonders relevant für schwer elektrifizierbare Sektoren wie den Schwertransport, die Schifffahrt und die Luftfahrt. In diesen Bereichen sind alternative Antriebe wie Elektro- oder Wasserstofftechnologien oft technisch oder wirtschaftlich nur schwer umsetzbar, unter anderem aufgrund ihrer niedrigen Energiedichte pro Kilogramm bei Batterien. Dies führt dazu, dass in vielen Anwendungen die benötigte Reichweite oder Leistung nicht erreicht werden kann. Die Drop-in-Fähigkeit der E-Fuels, die es ermöglicht, sie direkt in bestehenden Motoren und Infrastrukturen zu nutzen, macht sie zu einer attraktiven Ergänzung für eine nachhaltige Mobilität, ohne dass umfangreiche Umrüstungen erforderlich sind.

Die Elektrifizierung der Mobilität ist jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, da die notwendige Infrastruktur nicht überall gleich vorhanden ist. Während in einigen Regionen wie Europa ein zunehmender Ausbau von Ladeinfrastrukturen stattfindet, gibt es in anderen Gebieten, etwa ländlichen oder unterversorgten Regionen, noch erhebliche Defizite. Zudem erfordert die Nutzung von Strom, der im besten Fall grün produziert wird, zusätzliche Herausforderungen. In Europa kann beispielsweise Windenergie genutzt werden, um sauberen Strom zu erzeugen, während in Chile Patagonien durch die einzigartigen Wetterbedingungen mit bis zu 270 Volllaststunden pro Jahr besonders viel Windenergie produziert werden kann. Diese Variabilität der Energieproduktion kann die Effizienz und Verfügbarkeit grüner Energie in unterschiedlichen Regionen beeinflussen. E-Fuels bieten hier den Vorteil, dass sie Energie in einem transportablen Medium speichern können, das bei Bedarf wieder in Strom umgewandelt werden kann, wodurch die Flexibilität in der Energienutzung erhöht wird.

Dennoch stehen E-Fuels auch vor grossen Herausforderungen. Ihre Herstellung benötigt sehr viel Energie und ist derzeit noch kostspielig. Sowohl die Elektrolyse als auch die CO₂-Abscheidung erfordern grosse Mengen an erneuerbarer Energie, die aktuell nur begrenzt verfügbar ist. Zudem gehen während des gesamten Prozesses erhebliche Energiemengen verloren, was E-Fuels im Vergleich zu direkten elektrischen Antrieben weniger wettbewerbsfähig macht. Um diese Hindernisse zu überwinden, sind technologische Fortschritte und ein breiterer Zugang zu grünem Strom notwendig, damit E-Fuels ihr volles ökologisches Potenzial entfalten können.

Trotz dieser Herausforderungen bleibt das Potenzial von E-Fuels gross. In Kombination mit anderen Antriebstechnologien, wie der Elektrifizierung und Wasserstoffanwendungen, könnten sie zur CO₂-Reduktion beitragen und in schwer elektrifizierbaren Bereichen eine zukunftsfähige Lösung darstellen. Eine gezielte Förderung durch die Politik ist entscheidend, um die Entwicklung und Einführung von E-Fuels zu unterstützen und ihr Potenzial zu entfalten. So können auch in Zukunft Automobil-Enthusiasten ihre geliebten Oldtimer oder Sportwagen fahren und somit den Erhalt eines wichtigen Kulturguts sichern. Diese Diversität der Antriebstechnologien könnte schliesslich dazu führen, dass die Mobilität in Zukunft nachhaltiger, effizienter und flexibler gestaltet wird.

6.2 Reflexion / Lessons Learned

Diese Diplomarbeit bietet einen umfassenden Beitrag zu synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels). Es wird erläutert, was E-Fuels sind, wie sie hergestellt werden und welches Potenzial sie in der Mobilitäts- und Transportbranche haben könnten.

Leider konnte ich in dieser Arbeit nicht umfassend belegen, dass E-Fuels eine tatsächlich ressourcenschonende Mobilitätslösung darstellen. Verschiedene Studien verdeutlichen einen zentralen Aspekt: Die Herstellung von E-Fuels erfordert enorme Mengen an Energie, insbesondere in Form von Strom, der idealerweise aus erneuerbaren Quellen stammt. Damit bleibt die Frage offen, ob E-Fuels langfristig eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Kraftstoffen sein können.

Ein weiteres Hindernis bei der Erstellung der Arbeit war die zeitintensive Recherche nach fundierten Studien und verlässlichen Quellen zum Thema E-Fuels. Viele Informationen im Internet erwiesen sich als unbrauchbar oder schwer nachvollziehbar, da sie häufig von Werbung und unkritischen Darstellungen geprägt waren, die eher auf die Bekanntmachung des Themas als auf eine objektive Aufklärung abzielten. Diese Situation hat mich anfangs demotiviert und Zweifel daran aufkommen lassen, ob ich genügend verlässliche Daten für eine fundierte Analyse zusammenstellen könnte. In diesem Moment hat mir das Gespräch mit meinem betreuenden Dozenten sehr geholfen, meine Unsicherheiten zu überwinden und den Fokus wiederzufinden.

Ein zusätzlicher Zeitaufwand entstand durch die Tatsache, dass viele relevante Studien und Fachartikel auf Englisch verfasst waren, was das Lesen und Verstehen erschwerten und mehr Zeit als üblich erforderte. Für zukünftige Arbeiten dieser Art möchte ich daher mein Englisch weiter verbessern, um wissenschaftliche Texte schneller erfassen und besser analysieren zu können.

Eine weitere Herausforderung ergab sich durch meine berufliche Tätigkeit als Lastwagenfahrer. Da ich meist von frühmorgens bis spätabends unterwegs bin, blieb mir nur wenig Zeit, um an der Diplomarbeit zu arbeiten. Zwar nutzte ich die Abendstunden, um den Fortschritt voranzutreiben, doch war dies nach langen Arbeitstagen oft schwierig, da ich mental erschöpft war und die Effizienz darunter litt. Rückblickend habe ich erkannt, wie wichtig eine gut durchdachte Projektplanung ist, besonders wenn nur begrenzte Zeit zur Verfügung steht. Ein strukturierter Plan kann als Wegweiser dienen und sicherstellen, dass man sich auf die wesentlichen Aspekte konzentriert und sich im Thema nicht verliert.

Insgesamt bin ich dennoch zufrieden mit meiner Diplomarbeit, da sie eine solide Grundlage bietet und einen ersten Überblick über die Potenziale und Herausforderungen von E-Fuels vermittelt. Natürlich wäre eine tiefergehende Auseinandersetzung mit dem Thema wünschenswert gewesen, jedoch fehlte mir hierfür die nötige Zeit. Nichtsdestotrotz liefert die Arbeit wertvolle Grundinformationen und bildet eine gute Basis, um eine fundierte Diskussion über E-Fuels und deren Rolle in der zukünftigen Mobilität anzustossen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] P. Abkommen, „Wikipedia,“ 10 2024. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cbereinkommen_von_Paris.
- [2] P. A. China, „DW.COM,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://www.dw.com/de/china-will-bis-zum-jahr-2060-klimaneutralit%C3%A4t-erreichen/a-55021451>.
- [3] D. U. Neuling und L. Berks, „agora-verkehrswende,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/e-fuels-zwischen-wunsch-und-wirklichkeit#downloads>. [Zugriff am 07 11 2024].
- [4] Wasserstoff, „Wikipedia,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoff>.
- [5] bdew.de, „bdew.de,“ 10 2024. [Online]. Available: https://www.bdew.de/static/energie-city-1.58/images/assets/powertogas/Factsheet_Power-to-Gas_Wasserstoff_11-2019.pdf. [Zugriff am 07 11 2024].
- [6] T.-N. Wasserstoff-Elektrolyse, „TÜV-Nord,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/herstellung/elektrolyse-von-wasser/>.
- [7] H2-news, „H2-news,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://h2-news.de/glossary/dampfreformierung/>.
- [8] W. Kohlenstoff, „Wikipedia,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoff>.
- [9] powernews, „powernewz Direct Air Capture,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://www.powernewz.ch/rubriken/klimawandel-schweiz/co2-aus-der-luft-saugen-climeworks/>.
- [10] Ineratec, „Ineratec,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://www.ineratec.de/de/glossar/synthesegas>.
- [11] P. D. O. Deutschmann und Dipl.-Chem. T. Kaltschmitt, „kit.edu,“ 11 2024. [Online]. Available: https://www.itcp.kit.edu/deutschmann/download/2012_Otterstatter_Robin_WGS_RhPt_DA_KIT.pdf.
- [12] W. F. T. Synthese, „Wikipedia,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch-Synthese>.
- [13] I. F. T. Synthese, „Ineratec,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://www.ineratec.de/de/glossar/fischer-tropsch-synthese>.
- [14] P. E.-F. Patagonien, „newsroom.porsche,“ 11 2024. [Online]. Available: https://newsroom.porsche.com/de_CH/2022/unternehmen/porsche-highly-innovative-fuels-hif-eroeffnung-efuels-pilotanlage-haru-oni-chile-synthetische-kraftstoffe-30737.html.
- [15] Z. B. u. Diesel, „Quarks,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://www.quarks.de/technik/mobilitaet/diesel-und-benzin-woraus-besteht-kraftstoff/>.
- [16] S. u. D. Zusammensetzung, „Stromerzeuger-lexikon,“ 11 2024. [Online]. Available: <https://www.stromerzeuger-lexikon.de/dieseldieselkraftstoff/>.
- [17] Synhelion, „Synhelion.com über das Unternehmen,“ 10 2024. [Online]. Available: <https://synhelion.com/ueber-synhelion>.

- [18 Synhelion, „Synhelion.com Presse kit,“ 10 2024. [Online]. Available:
] <https://synhelion.com/press-kit>.
- [19 Synhelion, „Synhelion.com geschichte,“ 10 2024. [Online]. Available:
] <https://synhelion.com/about/history>.
- [20 efuel-alliance, „efuel-alliance.eu was sind efuels,“ 9 2024. [Online]. Available:
] <https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/was-sind-efuels>.
- [21 energie-lexikon, „energie-lexikon drop in kraftstoff,“ 10 2024. [Online]. Available:
] https://www.energie-lexikon.info/drop_in_kraftstoff.html.
- [22 r. s. Treibstoffe, „royalsociety.org synthetische Treibstoffe,“ 10 2024. [Online]. Available:
] <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf>.
- [23 e.-a. g. e. u. effizienz, „efuel-alliance globale energiepotenzial und effizienz,“ 10 2024.
] [Online]. Available: <https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/globale-energiepotenziale-effizienz>.
- [24 F. F. Experienc, „futurefuels Experience,“ 11 2024. [Online]. Available:
] <https://www.futurefuels-experience.de/>.
- [25 efuel-alliance, „efuel-alliance kosten und ausblick,“ 10 2024. [Online]. Available:
] <https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/kosten-ausblick>.

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Pariser Abkommen beteiligte Staaten.....	6
Abbildung 2 Projektstrukturplan.....	7
Abbildung 3 Projektablaufplanung.....	8
Abbildung 4: Produktionspfad E-Fuel.....	9
Abbildung 5: Zahlen und Fakten zu Wasserstoff.....	10
Abbildung 6: Erzeugungspfad Wasserstoff.....	11
Abbildung 7: Grundprinzip der Wasser-Elektrolyse.....	12
Abbildung 8: Alkalische Elektrolyseur.....	12
Abbildung 9: PEM-Elektrolyse.....	13
Abbildung 10: Kohlendioxid Kreislauf.....	15
Abbildung 11: Verfahren Direct Air Capture.....	16
Abbildung 12: Prozessfliessbild der E-Fuel produkton.....	18
Abbildung 13: Einteilung der Produktfraktionen.....	19
Abbildung 14: Vogelperspektive Produktionsstätte in Patagonien "Haru Oni".....	20
Abbildung 15: Technischer Ablauf der Anlage.....	21
Abbildung 16: Produktionsstätte DAWN in Jülich (D).....	22
Abbildung 17: Tabelle Energiedichte der Energieträger.....	24
Abbildung 18: Tabelle Treibstoffkosten pro Liter in Euro und Jahr.....	26
Abbildung 19: Beiträge zu den Gesamtkosten von E-Fuel.....	27
Abbildung 20: Verteilung der Kapitalkosten von E-Fuel.....	27
Abbildung 21:Wasserfall-Diagramm der Effizienzen verschiedener Antriebstechnologien.....	29
Abbildung 22: Nachfrage an Treibstoff in Millionen Tonnen pro Jahr in Luftfahrt und Marine.....	31
Abbildung 23: Erforderliche Fläche zur Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs im Jahr 2018.....	34
Abbildung 24: Karte: Export der Technologie, Import der Energie.....	35
Abbildung 25: E-Fuel Beimischung in den Treibstoffen von Fossiler Herkunft.....	36
Abbildung 26: Preisentwicklung an Tankstelle.....	37

8 Anhang

8.1 Arbeitsjournal

Datum	Was wurde gemacht	Benötigte Zeit in h
Montag, 16. September 2024	Informations Suche E-Fuel	2
Dienstag, 17. September 2024	Informations Suche E-Fuel	2.5
Mittwoch, 18. September 2024	Informations Suche E-Fuel	2
Donnerstag, 19. September 2024	Erstellen des Zeitplans in Excel	2
Freitag, 20. September 2024	Erstellen des Zeitplans in Excel	2
Samstag, 21. September 2024	Erstellen des Zeitplans in Excel	1.5
Samstag, 21. September 2024	Projektstruktur Baum erstellen	1
Samstag, 21. September 2024	Lesen der Studie E-Fuel zwischen Wunsch und Wirklichkeit	2
Dienstag, 24. September 2024	Informations Suche E-Fuel / Youtube / Lesen der Studie	2.5
Mittwoch, 25. September 2024	Informations Suche E-Fuel / Youtube / Lesen der Studie	2.5
Donnerstag, 26. September 2024	Information Suche E-Fuel	2
Donnerstag, 26. September 2024	Kick off Gespräch Stefan Schmidt	1.25
Freitag, 27. September 2024	Grundgerüst Diplomarbeit erstellen mit Inhaltsplanung	0.5
Freitag, 27. September 2024	Gespräch mit Urban Stöckli	0.5
Samstag, 28. September 2024	Projektinitialisierung schreiben	2
Montag, 30. September 2024	Bereitstellung Ausgangs Stoffe Wasserstoff	1.5
Dienstag, 1. Oktober 2024	Bereitstellung Ausgangs Stoffe Wasserstoff	2
Mittwoch, 2. Oktober 2024	Bereitstellung Ausgangs Stoffe Wasserstoff Elektrolyse	2
Donnerstag, 3. Oktober 2024	Bereitstellung Ausgangs Stoffe Wasserstoff Elektrolyse	5
Donnerstag, 3. Oktober 2024	Pariser Abkommen Vorwort	3
Freitag, 4. Oktober 2024	Bereitstellung Ausgangs Stoffe Kohlenstoff	4
Samstag, 5. Oktober 2024	Informationssuche DAC plus lesen der Studie vom Kit	5
Sonntag, 6. Oktober 2024	Herstellung Fischer Tropsch	6
Dienstag, 8. Oktober 2024	Informationssuche und Text verfassen Porsche Patagonien	1.5
Mittwoch, 9. Oktober 2024	Informationssuche und Text verfassen Porsche Patagonien	1.5
Donnerstag, 10. Oktober 2024	Informationssuche Synhelion plus verfassen	6
Freitag, 11. Oktober 2024	Transport Lager Drop in Information und Text	2
Freitag, 11. Oktober 2024	Transport Lager Drop in Information und Text	3
Samstag, 12. Oktober 2024	Zukunft Aussichten Informationssuche, Text	4
Sonntag, 13. Oktober 2024	E-Fuel royalsociety.org (Englische Studie studieren)	4
Dienstag, 15. Oktober 2024	Energiebedarf Herstellung E-Fuel	2
Mittwoch, 16. Oktober 2024	Energiebedarf Herstellung E-Fuel	2
Donnerstag, 17. Oktober 2024	E-fuel Kosten Herstellung	3
Donnerstag, 17. Oktober 2024	Gespräch mit Stefan Schmidt	2
Freitag, 18. Oktober 2024	Neu strukturieren der Arbeit (Formatieren)	2
Montag, 21. Oktober 2024	Swot Analyse	3
Dienstag, 22. Oktober 2024	Studie Lesen Synthese Gas uns schreiben	3
Mittwoch, 23. Oktober 2024	Kosten CO2 Abscheidung	1.5
Donnerstag, 24. Oktober 2024	Kosten Fischer Tropsch Synthese	3.5
Donnerstag, 24. Oktober 2024	Potenzial Produktion im grossen Massstab	3
Freitag, 25. Oktober 2024	Produktion von E-Fuels	3
Samstag, 26. Oktober 2024	Infrastruktur Anforderung	3
Sonntag, 27. Oktober 2024	Meine Meinung E-Fuel	4
Donnerstag, 31. Oktober 2024	Gespräch mit Stefan Schmidt	1.25
Donnerstag, 31. Oktober 2024	E-Fuel Kosten, bei Mischung	4
Freitag, 1. November 2024	E-Fuel Kosten, bei Mischung	2
Samstag, 2. November 2024	Reflexion / Lessons Learned	3
Sonntag, 3. November 2024	Lesen und verbessern	1.5
Montag, 4. November 2024	Lesen und verbessern	1.5
Dienstag, 5. November 2024	Lesen und verbessern	1.5
Mittwoch, 6. November 2024	Formatieren Quellenangaben ergänzen	1
Donnerstag, 7. November 2024	Formatieren Quellenangaben ergänzen	8
Freitag, 8. November 2024	Formatieren Quellenangaben ergänzen	2
Samstag, 9. November 2024	Formatieren Quellenangaben ergänzen	6
Sonntag, 10. November 2024	Lesen und verbessern	8
Gesamt		151.5

8.2 Redlichkeit Erklärung

Die Verfasserin/der Verfasser bestätigt mit ihrer/seiner Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Datum/Ort: 07.11.24 / 6314 Unterägeri

Unterschrift:



Stefano Mungo