

## Case Study for the Construction of a 10-bpd-ALF-FT Plant for the Production of Sustainable Synthetic Kerosene for the German Aviation Industry Based on Different Carbon Sources

The authors have successfully completed several desktop studies for German and international coal producers over the past two years. The main focus of these studies was on the one hand on the presentation of the market environment for sustainable synthetic fuels and on the other hand on the explanation of the technical and technological process and plant concept of ALF-FT technology. The strategic goal is to provide proof of the basic technical and economic feasibility (proof of concept) of the production of sustainable "green" fuels for the German aviation industry. Initial model calculations show that this 10-bpd system can be operated under certain conditions with a positive economic result. The authors are also currently involved in project developments aimed at using "green" hydrogen from alternative sources as a

feedstock on the one hand and CO<sub>2</sub> from "green" sources such as biogas plants on the other (PtX).

The aim is to put a semi-industrial Fischer-Tropsch plant with a capacity of 10 bpd (approximately 1,600 l/d) of FT product into continuous operation at one location in Germany within the next 24 months. Under current economic conditions, the ALF-FT process can produce a synthetic fuel with estimated costs in the range of 50 US\$/bbl.

The framework conditions set by the Federal Government, which is currently in the process of reforming its coal and raw materials industry, climate policy, mobility and technology research fields, will also be decisive for the implementation of such projects.

## Fallstudie zur Errichtung einer 10-bpd-ALF-FT-Anlage zur Herstellung von nachhaltigem synthetischem Kerosin für die deutsche Luftfahrtindustrie auf Basis unterschiedlicher Kohlenstoffträger

Die Autoren haben in den vergangenen zwei Jahren mehrere Desktop-Studien für deutsche und internationale Kohleproduzenten erfolgreich abgeschlossen. Die thematischen Schwerpunkte dieser Studien lagen zum einen auf der Vorstellung des Marktumfelds für nachhaltige synthetische Kraftstoffe und zum anderen auf der Erläuterung des technisch-technologischen Verfahrens- und Anlagenkonzepts der ALF-FT-Technologie. Das strategische Ziel liegt in der Erbringung des Nachweises der grundsätzlichen technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit (proof of concept) der Erzeugung von nachhaltigen „grünen“ Kraftstoffen für die deutsche Luftfahrtindustrie. Erste Modellrechnungen zeigen, dass eine semi-industrielle 10-bpd-Anlage unter bestimmten Voraussetzungen mit einem positiven wirtschaftlichen Ergebnis betrieben werden kann.

Die Autoren sind darüber hinaus gegenwärtig an Projektentwicklungen beteiligt, bei denen das Ziel besteht, als Feedstock auf der

einen Seite „grünen“ Wasserstoff aus alternativen Quellen und auf der anderen Seite CO<sub>2</sub> ebenfalls aus „grünen“ Quellen, wie z. B. Biogasanlagen zu nutzen (PtX).

Das Ziel besteht darin, innerhalb der nächsten 24 Monate eine semi-industrielle Fischer-Tropsch-Anlage mit einer Kapazität von 10 bpd (ca. 1.600 l/d) FT-Produkt an einem Standort in Deutschland in den Dauerbetrieb zu nehmen. Unter den aktuellen ökonomischen Rahmenbedingungen kann das ALF-FT-Verfahren einen Treibstoff mit geschätzten Kosten im Bereich von 50 US-\$/bbl produzieren.

Entscheidend für die Realisierung derartiger Projekte werden auch die Rahmenbedingungen sein, welche durch die sich gegenwärtig neu konstituierende Bundesregierung auf den Feldern Kohle- und Rohstoffwirtschaft, Klimapolitik, Mobilität und Technologieforschung gesetzt werden.

## 1 Introduction

In the light of the governments political decisions in respect of energy policy in Germany over the past decade, all companies with a carbon-based business model are undergoing a structural change. This change requires a strategic and innovative approach by these companies in order to safeguard the existing opportunities that coal has to offer in realising its existing economic potential. These activities must be ecologically and economically justifiable and align with the national environmental strategy.

A responsible approach to resolving this lies in the material utilization of coal in coal chemistry applications. Germany, in particular, has many years of experience and expertise in the field of coal chemistry, but in recent decades, this area of research has been further developed and advanced in other countries such as South Africa and China.

One of the most commercially effective methods in the field of coal processing is that of the Fischer-Tropsch process developed by Franz Fischer and Hans Tropsch in the 1920s of the previous century. This process, which has been successfully used in South Africa for decades, allows the production of synthetic intermediate products which can be further processed into high-quality products such as fuels, special waxes, plastics and polymers, as well as solvents and other high-quality chemicals. The application of these fuels offers significant environmental and health benefits compared with the utilisation of crude derived equivalents.

Thanks to such a diverse product range, the technology offers long-term and sustainable economic opportunities. In addition to the possibility of binding carbon for a long time in the form of plastic and polymer products, it is also possible to utilize the process to satisfy the increased fuel demand and the increased quality requirements of fuels with innovative and environmentally competitive products.

The opportunities and commercial potential offered by the conversion of local carbon sources into synthetic aviation fuels for the German market have been examined and evaluated. In order to achieve this strategic objective, the construction and operation of a 10-bpd Fischer-Tropsch plant is planned as the first step, under the project title "GG2L – green gas to liquid". This ALF-FT Plant will demonstrate the viability to economically produce a high value product in the form of sustainable synthetic fuel for the aviation industry (kerosene). This plant is capable of producing sufficient synthetic fuel for the required testing and approval processes.

The plant also provides the opportunity to supply sufficient product quantities for further developments in the field of fuel research, such as the use of Fischer-Tropsch gasoline and diesel with extremely low sulfur content. Based on testing done to date, the adoption of these fuels can make a major contribution to the reduction of nitrogen oxides and sulfur oxides (NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>) as well as particulate emissions in OEM engines.

## 2 Background

ALF Advanced Liquid Fuel UG is the marketer of a next generation Fischer-Tropsch synthesis technology (hereinafter referred to as "ALF-FT technology"). ALF is a joint venture of CCS Clean Carbon Solutions GmbH (CCS) and Holland & Hausberger (Pty) Ltd (H&H).

## 1 Einführung

Angesichts der energiepolitischen Entscheidungen in Deutschland in den letzten zehn Jahren befinden sich alle Unternehmen mit einem kohlenstoffbasierten Geschäftsmodell in einem strukturellen Wandel. Dieser Wandel erfordert ein vorausschauendes und innovatives Denken dieser Unternehmen, um die durchaus vorhandenen wirtschaftlichen Chancen und Potentiale der Kohle zu sichern. Diese Tätigkeiten müssen sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich vertretbar sein und sich an die nationale Umweltstrategie anpassen.

Eine verantwortungsvolle Herangehensweise bietet die stoffliche Nutzung der Kohle durch die Kohlechemie. Insbesondere Deutschland verfügte über langjährige Erfahrungen und Fachwissen auf diesem Gebiet, jedoch wurde gerade in den letzten Jahrzehnten die Forschung auf diesem Gebiet in anderen Ländern wie Südafrika und China weiterentwickelt und vorangetrieben.

Eines der kommerziell effektivsten Verfahren auf dem Gebiet der Kohleveredelung ist das von Franz Fischer und Hans Tropsch in den 1920er Jahren entwickelte Fischer-Tropsch-Verfahren. Dieses seit Jahrzehnten vor allem in Südafrika erfolgreich angewandte Verfahren ermöglicht die Herstellung von synthetischen Rohprodukten, die zu höherwertigen Produkten wie synthetischem Gas oder zu Kraftstoffen, Spezialwachsen, Kunststoffen und Polymeren bis hin zu Lösungsmitteln und anderen hochwertigen Chemikalien weiterverarbeitet werden können. Der Einsatz dieser synthetischen Produkte bietet im Vergleich zur Verwendung von Rohöläquivalenten erhebliche Vorteile für Umwelt und Gesundheit.

Mithilfe einer solch differenzierten Produktpalette bietet diese Technologie langfristige und nachhaltige wirtschaftliche Chancen. Neben der Möglichkeit einer langfristigen Kohlenstoffbindung in Form von Kunststoffen und Polymeren ergibt sich auch die Möglichkeit, die gesteigerte Kraftstoffnachfrage sowie die gesteigerten Qualitätsanforderungen an Kraftstoffe mit innovativen und umweltfreundlichen Produkten zu bedienen.

Die Chancen und das kommerzielle Potential, welches die Umwandlung von vorrangig einheimischen Kohlenstoffträgern in synthetische Flugkraftstoffe für den deutschen Markt bietet, wurden untersucht und bewertet. Um dieses strategische Ziel zu erreichen, sind in einem ersten Schritt die Errichtung und der Betrieb einer 10 bpd-Fischer-Tropsch-Anlage unter dem Projektnamen „GG2L – Green Gas to Liquid“ geplant. Diese ALF-FT-Anlage wird den direkten Nachweis der wirtschaftlichen Machbarkeit der Herstellung eines Hightech-Produkts in Form von nachhaltig produziertem, vollsynthetischem Kraftstoff (Kerosin) für die Luftfahrtindustrie erbringen. Diese Anlage ist in der Lage, für die erforderlichen Test- und Zulassungsprozesse eine ausreichend große Menge an synthetischem Kraftstoff zur Verfügung zu stellen.

Mit dieser Anlage ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, ausreichende Produktmengen für weitere Entwicklungen im Bereich der Kraftstoffforschung zu liefern, wie z. B. die Verwendung von Fischer-Tropsch-Benzin und -Diesel mit extrem niedrigem Schwefelgehalt. Basierend auf den bisher durchgeführten Tests kann der Einsatz dieser Kraftstoffe einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Stick- und Schwefeloxiden (NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>) sowie von Partikelemissionen in OEM Motoren leisten.

H&H has extensive experience in the design, construction and operation of demonstration Fischer-Tropsch plants with their first such plant becoming operational in 2008. The German MAN Diesel & Turbo SE, headquartered in Deggendorf, supported the mechanical design and fabrication of the reactors. This demonstration plant focused on the production of FT waxes and diesel products. H&H have also provided Feasibility and Prefeasibility Studies for a number of Coal-to-liquid projects around the world.

Since its foundation in 2013, CCS Clean Carbon Solutions GmbH has been involved in industrial projects for the production of synthetic fuels and has been responsible for desktop studies. The authors assume that local carbon sources (biogas, natural gas, lignite-based synthesis gas, etc.) are used as raw materials for the chemical industry.

An important reference to the attractiveness of such a project in Germany has been published by Elsen et al. (1). The authors point out in the "Summary and conclusion": that "In the chemical industry, natural gas and mineral oil can in some cases be replaced by lignite products, thus diversifying its raw material base. Among the larger number of possible alternatives, the production of Fischer-Tropsch naphtha, waxes and middle distillates as feedstock for the manufacture of plastics, lubricants, diesel and kerosene is particularly interesting as things stand today".

Given their perception of the state of the art of the technology in Germany, Elsen et al., expect a longer development process from around 10 years to the first industrial scale plants. Leveraging existing international expertise, the authors believe this can be significantly shortened and propose that the timeframe for planning of an industrial plant to be a period of about 5 years.

The market for synthetic fuels is still viable: the German aviation industry has a demonstrable demand for sustainable, alternative, fully synthetic fuels (30). This is the only way to meet the challenging climate protection targets of the German and international aviation industry. Using the local lignite as a raw material can also play an important role and allows the added benefit of the potential to drastically reduce the "carbon footprint" through suitable CCS & U technologies.

### 3 Economic relevance of the lignite industry

Germany's domestic lignite output added up to 178.1 mt in 2015. This extracted lignite had a net calorific value of 54.9 mtce. 159.3 mt, or almost 90%, of that output was used in utility power plants supplying the general public (2). In 2015, there were a total of 11,424 employees in the coal-mining districts of Helmstedt, Central Germany and Lusatia, including those employees in working lignite power plants supplying the general public (3).

Hans-Wilhelm Schiffer, Chief Executive Officer of the World Energy Resource Program of the World Energy Council (WEC) of the International Energy Agency (IEA) summarizes the growing role of coal in the context of the future of global energy supply as follows (4):

- Coal is a key component of a secure energy supply in all the regions/countries covered. The use of coal contributes not only to affordable energy prices but also to a better quality of life for all citizens and to a strengthening of industrial competitiveness in the respective economies.

## 2 Zum Hintergrund

ALF Advanced Liquid Fuel UG ist der Vermarkter einer Fischer-Tropsch-Synthese-Technologie der nächsten Generation (nachfolgend „ALF-FT-Technologie“ genannt). ALF ist ein Joint Venture von CCS Clean Carbon Solutions GmbH (CCS) und Holland & Hausberger (Pty) Ltd (H&H).

H&H verfügt über umfangreiche Erfahrungen im Design, Bau und Betrieb von Fischer-Tropsch-Demonstrationsanlagen. Die erste derartige Anlage wurde im Jahr 2008 in Betrieb genommen. Das deutsche Unternehmen MAN Diesel & Turbo SE mit Sitz in Deggendorf wirkte bei der mechanischen Auslegung und Fertigung der Reaktoren mit. Das Design dieser Demonstrationsanlage war auf die Produktion von FT-Wachsen und Diesel-Produkten ausgerichtet. Darüber hinaus hat H&H Machbarkeitsstudien für eine Reihe von Kohleverflüssigungsprojekten weltweit erstellt.

CCS Clean Carbon Solutions GmbH beschäftigt sich seit der Gründung im Jahr 2013 mit industriellen Projekten zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen und hat verantwortlich die Desktop-Studien bearbeitet. Die Autoren gehen heute von der Nutzung einheimischer Kohlenstoffträger (Biogas, Erdgas, Synthesegas auf Braunkohlenbasis u.a.) als Grundstoff für die chemische Industrie aus.

Ein wichtiger Hinweis auf die Möglichkeit, derartige Projekte auch in Deutschland realisieren zu können, wurde von Elsen e.a. gegeben (1). Die Autoren führen in „Zusammenfassung und Fazit“ dazu aus: „In der chemischen Industrie lassen sich Erdöl und Erdgas teilweise durch Braunkohlenprodukte ersetzen und so deren Rohstoffbasis auf eine breitere Grundlage stellen. Von den vielen möglichen Alternativen ist aus heutiger Sicht die Fischer-Tropsch-Route mit Produkten wie Naphtha, Wachsen und Mitteldestillaten als Ausgangsstoff für die Herstellung von Kunststoffen, Schmierstoffen, Diesel und Kerosin besonders interessant“.

Aufgrund ihrer Einschätzung des Stands der technologischen Entwicklung in Deutschland rechnen Elsen e. a. mit einem längeren Entwicklungsprozess von etwa 10 Jahren bis zu ersten industriellen Anlagen. Aufbauend auf dem vorhandenen internationalen Fachwissen unterstellen die Autoren jedoch, dass dieser Zeitraum sich erheblich verkürzen lässt und gehen daher bei der Planung für die Errichtung einer industriellen Anlage von einem Zeitraum von etwa fünf Jahren aus.

Der Markt für synthetische Kraftstoffe ist vorhanden. Nach wie vor hat die deutsche Luftfahrtindustrie sehr großes Interesse am Bezug von nachhaltigen, alternativen, vollsynthetischen Kraftstoffen (30). Nur auf diesem Weg können die anspruchsvollen Klimaschutzziele der deutschen und internationalen Luftfahrtindustrie erreicht werden. Der Einsatz der einheimischen Braunkohle als Rohstoff kann nur dann eine wichtige Rolle einnehmen, wenn es gelingt, den Carbon Footprint durch geeignete CCS & U-Technologien drastisch zu reduzieren.

### 3 Volkswirtschaftliche Bedeutung der Braunkohlenindustrie

Die Fördermenge der inländischen Braunkohlengewinnung betrug im Jahr 2015 178,1 Mio. t, entsprechend einem Heizwert von 94,9 Mio. t SKE. Von dieser Fördermenge wurden mit 159,3 Mio. t knapp 90% in Kraftwerken der allgemeinen Versorgung eingesetzt (2). Im Jahr 2015 gab es in den Braunkohlenrevieren Helm-

- Applying advanced coal-based technologies contributes to improving not only the environmental situation, but leads also to higher security of supply.
- There is no trade-off between an increased use of renewable energies and the use of coal; rather, coal and renewables complement each other and are partners in the effort to meet present and future energy requirements.

The use of coal as a raw material for the synthesis of fuels and chemicals has decades of commercial successful application. Especially in South Africa, the CTL technology was a significant contribution to energy supply and chemical production. In recent years, the possibility of alternative carbon-based fuels has also been discussed and explored in the USA, which has huge coal resources (5).

The topic of an alternative use of lignite outside the production of power is moving more and more into the focus of public interest (6). The public discussion calls for a responsible management of the raw material lignite, which can serve as the basis for innovative coal chemistry in the future (7).

North Rhine-Westphalia (NRW) parliament's Enquete commission came to the conclusion in their final report that the chemical industry is still too dependent on predominantly imported oil as a raw material. This is particularly problematic in view of Germany's import dependency for these materials, of which 98% of crude oil and 87% of natural gas is sourced through direct imports (8). The Commission therefore concluded that the chemical industry urgently needs a diversified raw material base and the associated security of supply.

#### 4 Market analysis for synthetic fuels for the aviation industry

According to ICAO calculations, international air traffic is growing steadily (Figure 1) and will increase by 4.8% annually until 2036

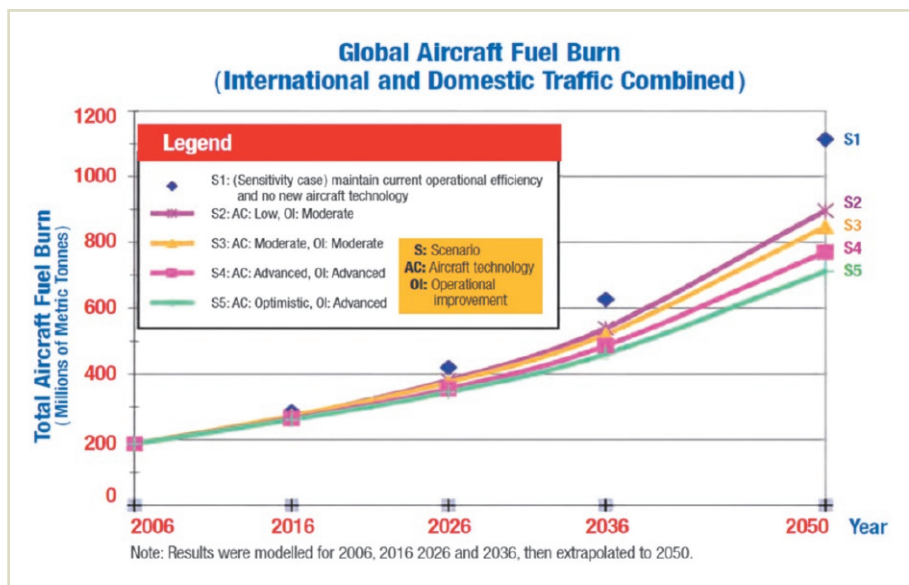


Fig. 1. Development of global kerosene consumption according to ICAO, 2010. Even under most optimistic scenarios, kerosene consumption will triple by 2050 (10).  
Bild 1. Entwicklung des weltweiten Kerosinverbrauches nach ICAO, 2010. Selbst unter dem optimistischsten Szenario verdreifacht sich der Kerosinverbrauch bis 2050 (10).

stedt, Mitteldeutschland und Lausitz 11.424 Mitarbeiter einschließlich Beschäftigter in den Braunkohlenkraftwerken zur allgemeinen Versorgung (3).

Die wachsende Rolle der Kohle im Kontext einer zukünftigen Sicherung der weltweiten Energieversorgung fasst Hans-Wilhelm Schiffer, Leitender Vorsitzender des World Energy Resource Programme des World Energy Council (WEC) der Internationalen Energie Agentur (IEA), u. a. wie folgt zusammen (4):

- Die Kohle ist wesentlicher Bestandteil einer sicheren Energieversorgung in allen betroffenen Regionen/Ländern. Die Nutzung von Kohle trägt nicht nur zu bezahlbaren Energiepreisen, sondern auch zu einer besseren Lebensqualität für alle Bürger und zu einer Stärkung der industriellen Wettbewerbsfähigkeit in den jeweiligen Volkswirtschaften bei.
- Der Einsatz zukunftsweisender kohlebasierter Technologien leistet nicht nur einen Beitrag zur Verbesserung der Umweltsituation, sondern führt auch zu einer höheren Versorgungssicherheit.
- Es gibt keinen Widerspruch zwischen der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien und dem Einsatz von Kohle. Vielmehr ergänzen sich Kohle und Erneuerbare gegenseitig und sind Partner im Bemühen um die Erfüllung heutiger und künftiger Energieanforderungen.

Die Verwendung von Kohle als Rohstoff zur Synthese von Kraftstoffen und Chemikalien findet seit Jahrzehnten eine erfolgreiche kommerzielle Anwendung. Vor allem in Südafrika leistete die CTL-Technologie einen signifikanten Beitrag zur Energieversorgung und Produktion von Chemikalien. In den letzten Jahren wurde gerade in den USA, die über große Kohleressourcen verfügen, die Möglichkeit von alternativen kohlebasierten Kraftstoffen diskutiert und industriell erforscht (5).

Auch in Deutschland rückt das Thema der alternativen Nutzung der Braunkohle abseits vom Strommarkt immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit (6). In dieser öffentlichen Diskussion wird ein verantwortungsvoller Umgang mit der Braunkohle gefordert, die als Basis für eine innovative Kohlechemie zukünftig dienen kann (7).

Die Enquetekommission des nordrhein-westfälischen Landtags stellt in ihrem Abschlussbericht fest, dass die chemische Industrie nach wie vor zu stark vom hauptsächlich importierten Rohstoff Erdöl abhängig ist. Dies ist gerade vor dem Hintergrund der Importabhängigkeit Deutschlands problematisch, die beim Erdöl 98% und beim Erdgas 87% beträgt (8). Die Kommission kommt daher zu dem Schluss, dass die chemische Industrie dringend einer diversifizierten Rohstoffbasis und der damit einhergehenden verbesserten Versorgungssicherheit bedarf.



(9). The demand for fuels for the German aviation industry will continue to increase in the coming years. According to the forecast of the “MKS study on renewable energies in transport 2015”, aviation fuel consumption in Germany alone will rise from 341 PJ in 2010 to 479 PJ in 2030, an increase of 40 % (10).

These developments of a significant increase in the demand for kerosene on the one hand and the fact that crude oil is becoming scarcer in the future on the other hand are predicted to lead to a significant increase in kerosene prices. Representatives of Agora Energiewende (a German think tank supporting the Energiewende in Germany) are already predicting a kerosene price of approx. 2.5 €/l for the period 2025 – 2030, compared to the current reference price of 0.61 €/l (11).

As a result of the emissions reduction agreed to by the industry in general, the demand for clean fuels has been significantly increased in the aviation industry. IATA (International Air Transport Association), the umbrella organization of the airlines, launched the initiative “Carbon-Neutral Growth 2020” in 2009 with the aim to achieving carbon-neutral growth by 2020 (12). This further requested that by the year 2050, CO<sub>2</sub> emissions should be reduced by 50 %, relative to the reference year 2005 (13). This is despite the projected growth of air traffic and travel.

In addition to the use of more efficient engines as well as measures for the optimisation of traffic logistics, it is the intention that emission reductions should be achieved mainly by the use of alternative fuels (blue area in Figure 2). In order to meet that target in Germany, aireg e.V. (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.) was founded in Germany in 2011. The members of aireg e.V., e.g., Airbus Group, Boeing International Corporation, Condor Flugdienst GmbH, Deutsche Lufthansa AG, are pursuing the goal of supporting and promoting the production and use of alternative fuels. CCS GmbH is a member of aireg e.V. and is working in the relevant working groups. Due to the increasing demand for alternative fuels, research and development activities in this sector have been increasing worldwide for some years now.

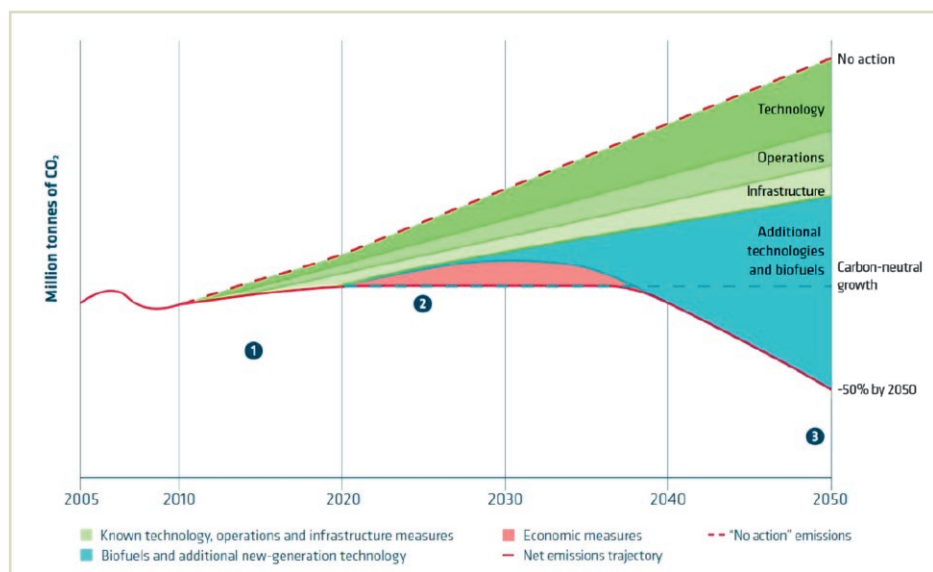


Fig. 2. Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by 1: more efficient fuels by 2020; 2: stabilization of net emissions by CO<sub>2</sub>-neutral growth; 3: halving CO<sub>2</sub> emissions by 2050 on basis of 2005 (14). // Bild 2. Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch 1: effizientere Treibstoffe bis 2020; 2: Stabilisierung der Nettoemissionen durch CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum; 3: Halbierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 auf der Basis von 2005 (14).

#### 4 Marktumfeld für alternative synthetische Kraftstoffe für die Luftfahrtindustrie

Nach den Berechnungen der ICAO wächst der internationale Luftverkehr stetig (Bild 1) und wird bis zum Jahr 2036 um jährlich 4,8% ansteigen (9). Der Bedarf an Kraftstoffen für die deutsche Luftfahrtbranche wird in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Nach der MKS-Studie „Erneuerbare Energien im Verkehr 2015“ wird allein in Deutschland der Kerosinverbrauch von 341 PJ im Jahr 2010 auf 479 PJ im Jahr 2030 ansteigen, was einer Zunahme um 40% entspricht (10).

Diese Entwicklungen – ein deutlich steigender Bedarf an Kerosin einerseits und ein in der Zukunft immer knapper werdender Rohstoff Erdöl andererseits – werden zu einem deutlichen Anstieg der Kerosinpreise führen. Die Vertreter von Agora Verkehrswende rechnen bereits für den Zeitraum der Jahre 2025 bis 2030 mit einem Kerosinpreis von ca. 2,5 €/l, im Vergleich liegt der aktuelle Referenzpreis bei 0,61 €/l Kraftstoff (11).

Als Folge der vereinbarten Emissionsverminderungen durch die Industrie ist auch in der Luftfahrtindustrie die Nachfrage nach sauberen Kraftstoffen deutlich gestiegen. Der Dachverband der Fluglinien IATA (International Air Transport Association) startete im Jahr 2009 die Initiative „Carbon-Neutral Growth 2020“, mit der sich der Verband verpflichtet, ab dem Jahr 2020 CO<sub>2</sub>-neutral zu wachsen (12). Zusätzlich wird gefordert, bis zum Jahr 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50%, bezogen auf das Referenzjahr 2005, zu reduzieren (13). Diese Forderungen gelten auch vor dem Hintergrund des prognostizierten Wachstums beim Luftverkehr.

Neben dem Einsatz von effizienteren Triebwerken sowie Maßnahmen zur Optimierung der Verkehrslogistik sollen die Emissionssenkungen vor allem durch den Einsatz von alternativen Kraftstoffen realisiert werden (blau in Bild 2). Um die Erreichung dieses Ziels in Deutschland zu befördern, wurde im Jahr 2011 der aireg e.V. (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.) gegründet, der mit seinen Mitgliedern, z.B. Airbus Group, Boeing International Corporation, Condor Flugdienst

GmbH, Deutsche Lufthansa AG, das Ziel verfolgt, die Herstellung und Nutzung alternativer Kraftstoffe zu forcieren und voranzutreiben. Die CCS GmbH ist Mitglied bei aireg e.V. und arbeitet in den entsprechenden Arbeitskreisen mit.

Aufgrund des steigenden Bedarfs an alternativen Kraftstoffen steigen seit einigen Jahren die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in diesem Sektor weltweit an.

##### 4.1 Vorteile alternativer Kraftstoffe

Vollsynthetische Kraftstoffe haben für die Luftfahrtindustrie enorme Vorteile. Wie das ECLIF-Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gezeigt hat, verbrennen synthetische Kraftstoffe sauberer und sind damit umweltfreundlicher als herkömmliches Kerosin. Die Emission von Rußpartikeln wird um bis zu 50% reduziert und eine

#### 4.1 Advantages of alternative fuels

Fully synthetic fuels have enormous advantages for the aviation industry. The DLR's ECLIF-project has shown, that synthetic fuels are safer and more environmentally friendly than conventional kerosene. The emissions of soot particulate matter (PM) are reduced by up to 50 % and a significant reduction of CO<sub>2</sub> as well as of nitrogen oxides and sulfur oxides is achievable. The lower PM production also increases the technical performance of the turbines and leads to longer service and maintenance intervals (15).

In the July 2017 position paper of the ProcessNet Working Committee on Alternative Liquid and Gas Fuels, the advantages of alternative liquid fuels are characterized as follows (16):

“In summary, it can be assumed that the demand for advanced alternative liquid fuels will increase dramatically both internationally and nationally in the next 30 years for climate protection reasons. Products with drop-in quality will be particularly popular. Progressive alternative liquid fuels will play a key role in the implementation of the energy turnaround and the achievement of climate protection targets. Policymakers are called upon to intensify R&D funding in this area, in particular in order to meet the considerable demand for liquid fuels in the transport sector in the coming decades “.

Currently Synthetic fuels have only been approved for the addition to petroleum-based kerosene, up to a maximum of 50 % synthetic material.

With the proving up of a Fischer-Tropsch-based process for producing of sustainable synthetic kerosene, the authors are pursuing the goal to realize these potentials. Various carbon-containing feedstock materials are available (biogas and biomethane, coal-based synthesis gas, natural gas, etc.), which can be converted to synthetic kerosene by a new and innovative Fischer-Tropsch process. The usage of a variety of alternative carbon feedstocks also addresses the current negative perception of purely coal based feed materials.

#### 4.2 Market potential for lignite-based fuel

The usage of lignite as an energy source for power generation will, in all probability, drastically decline in the coming years in Germany. This creates a great potential for the use of the lignite that is currently being mined but will no longer have an offtake market. In view of the great static range of lignite in Germany and in many regions of the world, the positive environmental characteristics of alternative fuels and an environmentally compatible processing technology, this brings a unique opportunity to the German as well as the international aviation industry.

A lower fuel costs offer airlines the opportunity to compensate future CO<sub>2</sub> taxes from their usage of the fuel. Under current economic conditions, the ALF-FT process can produce a synthetic fuel with estimated costs in the range of 50 US\$/bbl. Due to the current crude oil source, the prices of aviation fuels are subject to considerable fluctuation risks due to potential international incidents, political risks and supply bottlenecks. This leads to major financial planning risks for airlines, as the fuel costs account for about 30 to 40 % of the total operating costs.

Building a value chain to produce synthetic fuels based on domestic raw materials would make it possible to reduce the sup-

signifikante Senkung von CO<sub>2</sub> sowie von Stick- und Schwefeloxiden wird erreicht. Durch die geringere Rußentwicklung erhöht sich auch die technische Leistungsfähigkeit der Turbinen und führt zu kürzeren Standzeiten und längeren Wartungsintervallen (15).

Im Positionspapier des ProcessNet-Arbeitsausschusses „Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe“ vom Juli 2017 werden die Vorteile alternativer flüssiger Kraftstoffe wie folgt charakterisiert (16):

„Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf an fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen aus Klimaschutzgründen in den nächsten 30 Jahren sowohl international als auch national dramatisch ansteigen wird. Besonders begehrt werden dabei Produkte mit Drop-in-Qualität sein. Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe werden bei der Umsetzung der Energiewende und der Erreichung der Klimaschutzziele eine Schlüsselrolle spielen. Die Politik ist aufgefordert, die F&E-Förderung in diesem Bereich zu intensivieren, um insbesondere dem erheblichen Bedarf an Flüssigkraftstoffen im Transportsektor in den nächsten Jahrzehnten gerecht zu werden.“

Synthetische Kraftstoffe sind gegenwärtig als maximal 50%-Zusatz zu erdölbasiertem Kerosin zugelassen. Mit dem erfolgreichen Nachweis eines Fischer-Tropsch-basierten Verfahrens zur Herstellung eines nachhaltigen synthetischen Kraftstoffs wird seitens der Autoren das Ziel verfolgt, genau diese Potentiale voll auszuschöpfen. Als Ausgangsstoff stehen verschiedene kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterialien zur Verfügung (Biogas und Biomethan, kohlebasiertes Synthesegas, Erdgas etc.), die durch ein neues und innovatives Fischer-Tropsch-Verfahren zu synthetischem Kerosin umgesetzt werden können. Die Verwendung einer Vielzahl alternativer kohlenstoffhaltiger Ausgangsmaterialien vermindert auch die derzeitige negative Wahrnehmung rein kohlebasierter Einsatzstoffe.

#### 4.2 Marktpotential der Braunkohle für kohlebasierte Kraftstoffe

Die Braunkohle als Energieträger zur Stromerzeugung wird in den nächsten Jahren in Deutschland aller Voraussicht nach stark rückläufig sein. Damit wird ein großes Potential für die stoffliche Nutzung der geförderten Braunkohle frei, welche möglicherweise zukünftig über keinen Abnehmer mehr verfügen würde. Angesichts der großen statischen Reichweite der Kohle in Deutschland und zahlreichen Regionen der Welt, den positiven Umwelteigenschaften alternativer Kraftstoffe und einer umweltverträglichen Verarbeitungstechnologie, bietet sich hier eine gute Chance für die deutsche und internationale Luftfahrtindustrie.

Günstigere Treibstoffpreise für synthetisch erzeugte Kraftstoffe bieten Fluggesellschaften die Möglichkeit, zukünftige CO<sub>2</sub>-Steuern einfacher kompensieren zu können. Unter den aktuellen ökonomischen Rahmenbedingungen kann das ALF-FT-Verfahren einen Treibstoff mit geschätzten Kosten im Bereich von 50 US-\$/bbl produzieren. Derzeit unterliegen die Preise für Flugkraftstoffe auf Grund der Erdölbasis erheblichen Schwankungsrisiken durch potentielle internationale Zwischenfälle, politische Risiken und Lieferengpässe. Dies führt zu großen finanziellen Planungsrisiken für Fluggesellschaften, da die Treibstoffkosten 30 bis 40 % der Gesamtbetriebskosten ausmachen.

ply related price risks significantly. Domestic raw materials also ensure value creation and jobs in Germany and are therefore part of a national value chain (17).

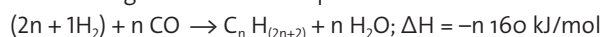
## 5 Efficiency and innovation of ALF-FT technology

### 5.1 The FT process and selected current application

In 1925 Franz Fischer and Hans Tropsch developed an industrial process in order to convert syngas into high-quality hydrocarbons (Fischer-Tropsch-Process or FT synthesis). This process was initially used to produce petrol and diesel fuels. The FT synthesis is part of an overall process in order to synthesize fuels from carbon-containing raw material. The overall process consists of three different sub-steps (18):

Syngas Production → FT Synthesis → Product Upgrade

The solid carbonaceous raw material is converted into syngas by gasification. Subsequently, the syngas is purified by a gas scrubbing that removes impurities and volatiles to the required levels for downstream processing. The carbon monoxide (CO) and hydrogen (H<sub>2</sub>) contained in the syngas are converted into hydrocarbon chains of different length in the subsequent catalytic FT synthesis. The general reaction equation is:



This reaction proceeds in a pressure range of 20 to 40 bar and within a temperature range of 200 to 350 °C in the synthesis reactors and is promoted through a catalyst. The catalysts used are, generally, iron and cobalt catalysts. The choice of the catalyst impacts the product spectrum (19).

Nowadays FT synthesis is used mainly for the synthesis of petroleum fuels, diesel fuels and coal- or gas-derived waxes (CtL = Coal to Liquid, GtL = Gas to Liquid), e.g. Sasol in South Africa. In general, the so-called XTL process is used, where the X is a variable source (gas, biomass, energy, coal, etc.). In Germany, there is currently some research and development projects (R & D) on XTL (for example, Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Sunfire GmbH Dresden).

In addition to the catalyst, the type of reactors affects the product spectrum (20).

Developments on the biofuel market and efforts to put fuel supply on a secure and sustainable basis lead to the fact that Fischer-Tropsch technology has once again become the focus of the science landscape. In the following section, three projects are presented which reflect the current scientific and technological status.

### 5.2 Project BioTFuels

The currently producing "plants" work with a capacity of 1 l/d of product on the laboratory scale (21). The BioTFuel project is a joint project founded in 2010 with the aim of developing a marketable process chain for BtL fuels. The project is scheduled to run for a period of 10 years and has a budget of 180 m €. Partners in this project include IFP Energies Nouvelles (IFP), French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Axens (Axens), thyssenkrupp Industrial Solutions AG (tk IS) and Total. The project has currently completed the research and development phase and is now entering the demonstration phase (22). Two test facilities are currently being built in France for this purpose. The first

Der Aufbau einer lokal basierten Wertschöpfungskette zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe auf der Basis einheimischer verfügbarer Rohstoffe, würde es ermöglichen, die Preisrisiken der Treibstoffversorgung deutlich zu reduzieren. Heimische Rohstoffe sorgen für Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Deutschland und sind somit Teil einer nationalen Wertschöpfungskette (17).

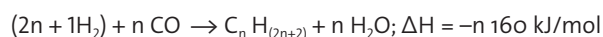
## 5 Effizienz und Innovation der ALF-FT-Technologie

### 5.1 Das Fischer-Tropsch-Verfahren und ausgewählte aktuelle Anwendungen

Das im Jahr 1925 von Franz Fischer und Hans Tropsch entwickelte großtechnische Verfahren (Fischer-Tropsch-Verfahren oder FT-Verfahren) ermöglicht die Umwandlung von Synthesegas in hochwertige Kohlenwasserstoffe. Es diente ursprünglich zur Herstellung von Benzin und Dieselmotorkraftstoffen. Die FT-Synthese ist dabei nur ein Teilprozess eines Gesamtverfahrens, um aus einem kohlenstoffhaltigen Rohstoff Kraftstoffe zu synthetisieren. Das Gesamtverfahren besteht aus drei Teilschritten (18):

Synthesegaserzeugung → FT-Synthese → Produktaufbereitung

Der feste kohlenstoffhaltige Rohstoff wird durch Vergasung in Synthesegas umgewandelt. Anschließend wird das Synthesegas durch eine Gaswäsche von Verunreinigungen und flüchtigen Bestandteilen bis auf das notwendige Level für die weitere Verarbeitung gereinigt. Das im Synthesegas enthaltene Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) werden in der anschließenden katalytischen Synthese in unterschiedlich lange Kohlenwasserstoffketten umgewandelt. Die allgemeine Reaktionsgleichung lautet:



Diese Reaktion läuft in einem Druckbereich von 20 bis 40 bar und innerhalb eines Temperaturbereichs von 200 bis 350 °C in Synthesereaktoren ab und wird durch einen Katalysator befördert. Als Katalysatoren kommen vor allem Eisen- und Kobaltkatalysatoren zum Einsatz. Die Wahl des Katalysators beeinflusst dabei maßgeblich das Produktspektrum (19).

Das FT-Verfahren wird heutzutage vor allem für die Synthese von Ottokraftstoffen, Dieselmotorkraftstoffen und Wachsen aus Kohle oder Gas verwendet (CtL – Coal to Liquid, GtL – Gas to Liquid), z. B. von SASOL in Südafrika. Im Allgemeinen spricht man bei den genannten Verfahren von XTL-Verfahren, wobei das X für einen variablen Ausgangsstoff steht (Gas, Biomasse, Energie, Kohle u. a.). In Deutschland laufen zum gegenwärtigen Zeitpunkt einige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F&E) zum Thema XTL-Verfahren als auch zum FT-Verfahren, z.B. Clausthaler Umwelttechnik-Institut oder Sunfire GmbH, Dresden.

Neben dem Katalysator beeinflusst auch der Reaktortyp das zu erwartende Produktspektrum (20).

Gerade die Entwicklungen auf dem Biokraftstoffmarkt sowie Bestrebungen, die Kraftstoffversorgung auf eine sichere und nachhaltige Basis zu stellen, führen dazu, dass die FT-Technologie wieder in den Fokus der Wissenschaftslandschaft gerückt ist. Nachfolgend werden exemplarisch drei Projekte vorgestellt, die den aktuellen wissenschaftlichen und technologischen Stand widerspiegeln.

demonstration plant is being built in Venette and will be used for pre-treatment of the biomass (torrefaction). A second plant is being built in Dunkirk (21). The gasification of the torrefied biomass takes place in a PRENFLO® gasifier developed by tk IS. The syngas is then processed in a micro-fischer-tropsch bubble column reactor with a current capacity of 1 l/d using the Axens Gasel™ technology (23).

### 5.3 COMET project “1 barrel/day”

Within the scope of the COMET programme (Competence Centers for Excellent Technologies), a research programme under the Austrian technology development policy, a plant for the production of diesel and kerosene from wood has been completed at the Güssing site in the Burgenland after a one-year construction period. The researchers are focusing on diesel and kerosene because there are no alternative propulsion systems available, especially in aviation, and diesel will also be used for the foreseeable future in heavy goods vehicles. The pilot plant will serve as the basis for a future refinery (24).

During the next phase of the project, the plant is to be operated and data gathered for the upscaling of the plant to industrial scale. The plant is based on traditional Fischer-Tropsch synthesis with a “slurry reactor”. A further research objective is to test the fuel produced from the rig under real conditions on modern diesel vehicles (25).

### 5.4 Project Sunfire

Based in Dresden, the Sunfire company is pursuing the goal of producing synthetic fuels such as gasoline, diesel and kerosene by means of its power-to-liquid process. Sunfire operates a pilot plant in Dresden with a capacity of 1 bpd (26). The raw materials used are CO<sub>2</sub> from a biogas plant and hydrogen, which has been produced using high-temperature electrolysis (27).

### 5.5 ALF demonstration

In contrast to this very small-scale approach which introduces significant scale up risk when the aforementioned technologies are brought to commercial operation, the authors intend to construct and operate a semi-industrial plant with a capacity of 10 bpd, which is about 10 to 100 times larger than the projects described above. The motivation for the larger capacity is to firstly be able to produce sufficient material for the required provenance testing, and secondly to provide the confidence for commercial investors in the implementation of the technology. This is a realistic objective, as ALF UG can draw on the experience of H&H in terms of the design, construction commission and operation of demonstration FT plants of this nature.

At the “8th International Freiberg Conference on IGCC & XtL-Technologies”, which took place in Cologne from 12th to 16th of June 2016, the authors presented their experiences, advantages and possible applications in the aviation industry of the FT process (XtEL) developed by them (28).

### 5.6 Description of the 10-bpd ALF-FT plant

Based on potential feedstocks available at the possible sites, the authors have developed the preliminary plant design for a 10-bpd semi-industrial plant.

### 5.2 Projekt BioTfuels

Die gegenwärtig produzierenden Anlagen arbeiten mit einer Kapazität von 1 l/d im Labormaßstab (21). Das Projekt BioTfuel ist ein im Jahr 2010 gegründetes Verbundvorhaben mit dem Ziel, eine marktfähige Prozesskette für BtL-Kraftstoffe zu entwickeln. Das Vorhaben ist für einen Zeithorizont von zehn Jahren vorgesehen und mit einem Budget von 180 Mio. € ausgestattet. Partner in diesem Projekt sind u.a. IFP Energies Nouvelles (IFP), French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Axens (Axens), thyssenkrupp Industrial Solutions AG (tk IS) und Total. Aktuell hat das Projekt die F&E-Phase abgeschlossen und startet in die Demonstrationsphase (22). Dazu entstehen zwei Testanlagen in Frankreich. Die erste Demonstrationsanlage in Venette dient zur Vorbehandlung der Biomasse (Torrefizierung), in einer zweiten Anlage in Dünkirchen (21) findet die Vergasung der torrefizierten Biomasse in einem von tk IS entwickelten PRENFLO®-Vergaser statt. Anschließend wird das Syngas in einem Mikro-FT-Blasensäulen-Reaktor mit einer gegenwärtigen Kapazität von 1 l/d unter Einsatz der Axens Gasel™ Technologie weiterverarbeitet (23).

### 5.3 COMET-Projekt „1 barrel/Tag“

Im Rahmen des COMET-Programms (Competence Center for Excellent Technologies), einem Forschungsprogramm der österreichischen Technologiepolitik, wurde am Standort Güssing im Burgenland eine Anlage zur Produktion von Diesel und Kerosin aus Holz nach einjähriger Bauzeit fertiggestellt. Die Forscher setzen auf Diesel und Kerosin, da vor allem in der Luftfahrt keine alternativen Antriebe zur Verfügung stehen, auch im Schwerverkehr werde Diesel in absehbarer Zukunft zum Einsatz kommen. Die Versuchsanlage soll als Grundlage für eine zukünftige Raffinerie dienen (24).

Während der nächsten Projektphase sollen die Anlage betrieben und Daten für ihr Upscaling auf Industriegröße gewonnen werden. Die Anlage basiert auf der traditionellen FT-Synthese mit einem „Slurry Reaktor“. Ein weiteres Forschungsziel ist es, den von der Anlage produzierten Treibstoff unter realen Bedingungen an modernen Dieselfahrzeugen zu testen (25).

### 5.4 Projekt Sunfire

Das in Dresden ansässige Unternehmen Sunfire verfolgt mit seinem PtL-Verfahren das Ziel, flüssige Kraftstoffe wie Benzin, Diesel und Kerosin synthetisch zu produzieren. Dazu betreibt Sunfire eine Pilotanlage in Dresden mit einer Kapazität von etwa 1 Barrel pro Tag (26). Als Rohstoffe dienen CO<sub>2</sub> aus einer Biogasanlage und H<sub>2</sub>, der mittels Hochtemperatur-Elektrolyse gewonnen wurde (27).

### 5.5 ALF-Demonstration

Im Gegensatz zu diesem eher kleinteiligen Ansatz, welcher erhebliche Risiken für das Upscaling zu Industrieanlagen birgt, beabsichtigen die Autoren die Errichtung und den wirtschaftlichen Betrieb einer semi-industriellen Anlage mit einer Kapazität von 10 bpd, die damit um den Faktor 10 bis 100 größer als die oben vorgestellten Projekte ist. Die Motivation für die höhere Kapazität besteht darin, zum einen ausreichend Material für die Zulassungsverfahren produzieren zu können und zum anderen gewerblichen und Finanzinvestoren das Vertrauen in die Umset-



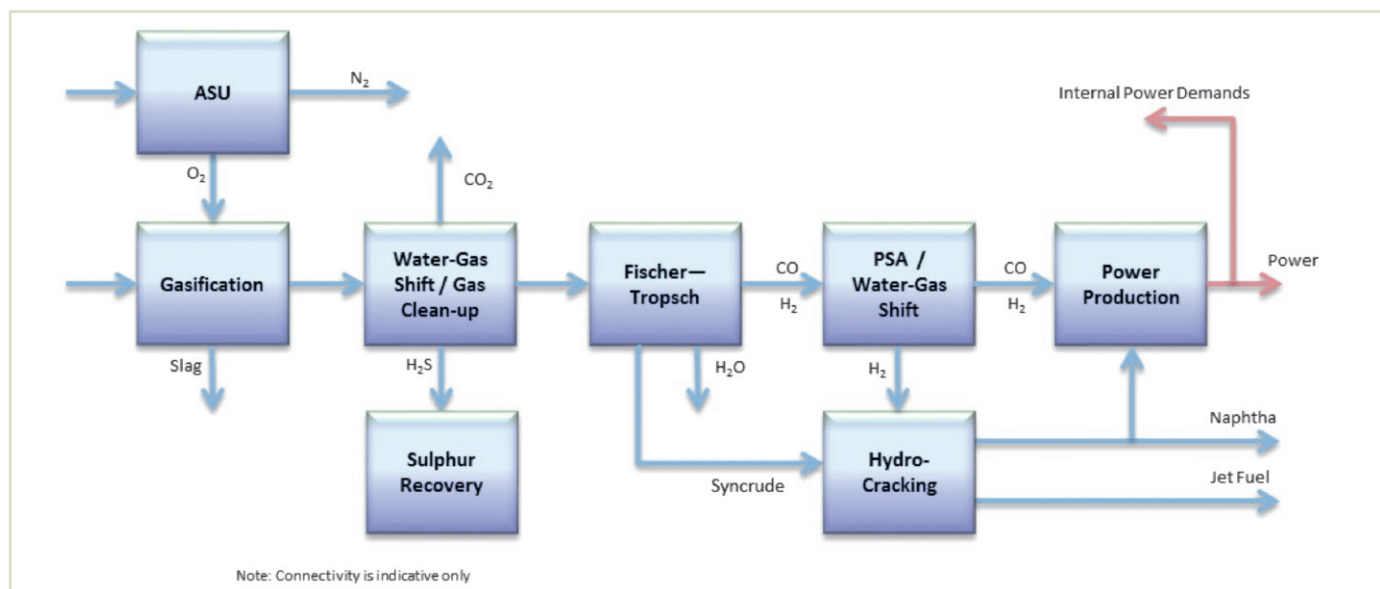


Fig. 3. XtEL™ Once-Through-Process. // Bild 3. XtEL™ Once-Trough-Prozess. Source/Quelle: ALF

### 5.6.1 Base design case

The process description below relates to the design for a demonstration facility for the production of sustainable synthetic kerosene from syngas.

Given the proposed scale of operation, and the intention of the demonstration facility to produce liquid fuel products, this facility will incorporate the XtEL™ once through system to optimize the usage of syngas and minimise the upfront requirements for gasification. The once-through process offers the opportunity for power generation from the tailgas (Figure 3). This once-through design maximises the thermal efficiency of the plant which ultimately results in improved financial returns.

The Fischer-Tropsch system is designed to operate in different modes (“once through”, “recycle”, or “parallel mode”). This system design allows a more flexible process control and thus the possibility to test different configurations of the system.

In the once-through mode, the synthesis gas is converted into the three FT reactors connected in series. The unconverted “tail gas” is passed on to the exhaust gas treatment. In the recycle mode, the unconverted tail gas is recycled and fed back to the first FT reactor. In parallel mode, all three FT reactors are operated with fresh synthesis gas.

The syncrude and Fischer-Tropsch wax products produced in the reactors are converted through the appropriate hydro treatment processes to provide the maximum yield of the required products.

### 5.6.2 Product yields

As with any FT process, the reactors yield a diesel, naphtha and heavy oil fractions as well as an FT wax and reaction water product. Typical yields of these products, after suitable product treatment, are given in Figure 4 and Figure 5.

## 5.7 Evaluation of the ALF-FT process compared to conventional FT processes

According to an evaluation by the IEC Institute for Energy Process Engineering and Chemical Engineering at the TU Bergakademie

Freiberg, the authors give an overview of the current state of the technology to give. This is a realistic target setting, as ALF UG can draw on the experiences of H&H in the planning, construction and operation of FT pilot plants of this type.

At the 8th International Freiberg Conference on IGCC & Xtl-Technologies, which took place from June 12 to 16, 2016 in Cologne, the authors presented their experiences, advantages and application possibilities of the FT process they developed (XtEL™) in the aviation industry.

### 5.6 Beschreibung der 10-bpd-ALF-FT-Anlage

Starting from the possible locations in Germany, the authors have developed a first plant layout for a semi-industrial 10-bpd plant.

#### 5.6.1 Basisdesign

The following process description refers to the design for a test plant for the production of sustainable synthetic kerosene from syngas.

In view of the planned capacity of the plant and the objective of the demonstration plant, liquid fuels are to be produced, the “XtEL™ Once-through-Process” is applied, which on the one hand optimizes the use of synthesis gas and on the other hand reduces the pre-requisites for gasification. In the once-through process, additional power is generated from the tail gas (Figure 3). The once-through design maximizes the thermal efficiency of the plant, which ultimately leads to improved economic results.

The FT plant is designed so that it can be operated in different modes (“once-through”, “recycle”, or “parallel mode”). This plant design enables a more flexible process control. In addition, it is possible to test different configurations of the plant.

In the once-through mode, the synthesis gas is converted in three series-connected FT reactors. The unconverted “tail gas” is sent to exhaust gas treatment. In the recycle mode, the unconverted tail gas is recycled and fed back to the first FT reactor.

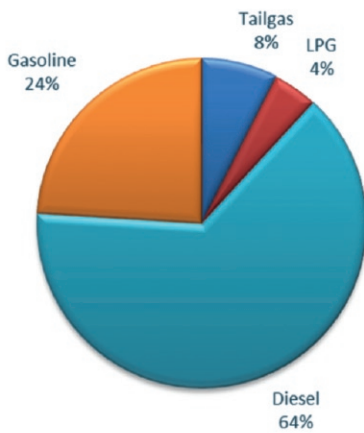


Fig. 4. Typical Diesel and Gasoline Yields.  
Bild 4. Typische Diesel- und Benzinausbeute.  
Source/Quelle: ALF

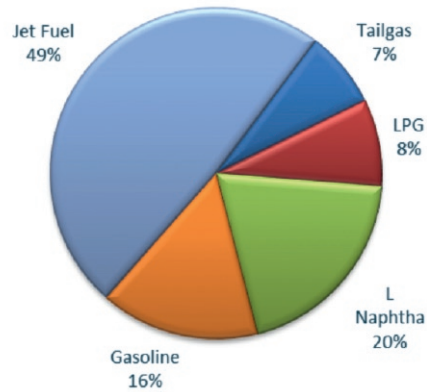


Fig. 5. Typical Jet Fuel and Gasoline Yields.  
Bild 5. Typische Jet Fuel und Benzinausbeute.  
Source/Quelle: ALF

Freiberg (29), the ALF-FT process is an innovative and efficient variant of low-temperature FT synthesis (Figure 6). The innovative nature of the process consists in the implementation of a so called Once Through – reactor concept. In this concept, several reactors are connected in series with product / educt heat exchangers and product separation between the reactor stages used. The catalyst used in the reactor is decisive for the quality and the yield of the FT product.

This makes the ALF-FT technology significantly different from competing FT methods. With the Once Through reactor concept significant cost advantages are achieved (no circulating gas compressors and no reformers required) and a reduced CO<sub>2</sub> emission.

The FT catalyst is distinguished by high conversion rates of the syngas, with a particularly high selectivity of middle distillates.

An additional benefit of the new developed catalyst is the significantly higher activity of the water-gas shift reaction compared to cobalt based catalysts which are commonly used in low

und dem ersten FT-Reaktor erneut zugeführt. Im Parallelmodus werden alle drei FT-Reaktoren mit frischem Synthesegas betrieben.

Die in den FT-Reaktoren hergestellten flüssigen Kraftstoffe sowie die Fischer-Tropsch-Wachstprodukte werden durch entsprechende Aufbereitungsverfahren weiter veredelt, um eine möglichst hohe Produktausbeute zu erreichen.

### 5.6.2 Produktausbeute

Wie bei jedem FT-Verfahren produzieren die Reaktoren Diesel-, Naphtha- und Schwerölfractionen sowie FT-Wachse und Reaktionswasserprodukte. Das typische Produktspektrum ist in Bild 4 und Bild 5 dargestellt.

### 5.7 Bewertung des ALF-FT-Verfahrens gegenüber konventionellen FT-Verfahren

Gemäß einem Gutachten vom IEC Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen an der TU Bergakademie Freiberg (29) stellt das ALF-FT-Verfahren eine innovative und effiziente Variante der Niedertemperatur-FT-Synthese dar (Bild 6). Der innovative Charakter des Verfahrens besteht in der Umsetzung eines sogenannten Once-Through-Reaktorkonzepts. Bei diesem Konzept kommen mehrere in Reihe geschaltete Rohrbündelreaktoren mit Produkt/Edukt-Wärmetauschern und Produktabtrennung zwischen den Reaktorstufen zum Einsatz. Der ausgewählte Katalysator ist entscheidend für die Qualität und die Ausbeute des erzeugten FT-Produkts.

Damit unterscheidet sich die ALF-FT-Technologie erheblich von den konkurrierenden FT-Verfahren. Mit dem Once-Through-Reaktorkonzept werden nicht nur erhebliche Kostenvorteile erreicht – es sind keine Kreislaufgas-Verdichter und keine Reformer erforderlich – sondern auch die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden reduziert.

Der eingesetzte FT-Katalysator zeichnet sich durch hohe Konversionsgrade des Synthesegases aus, mit einer besonders hohen Selektivität zur Bildung von Mitteldestillaten.

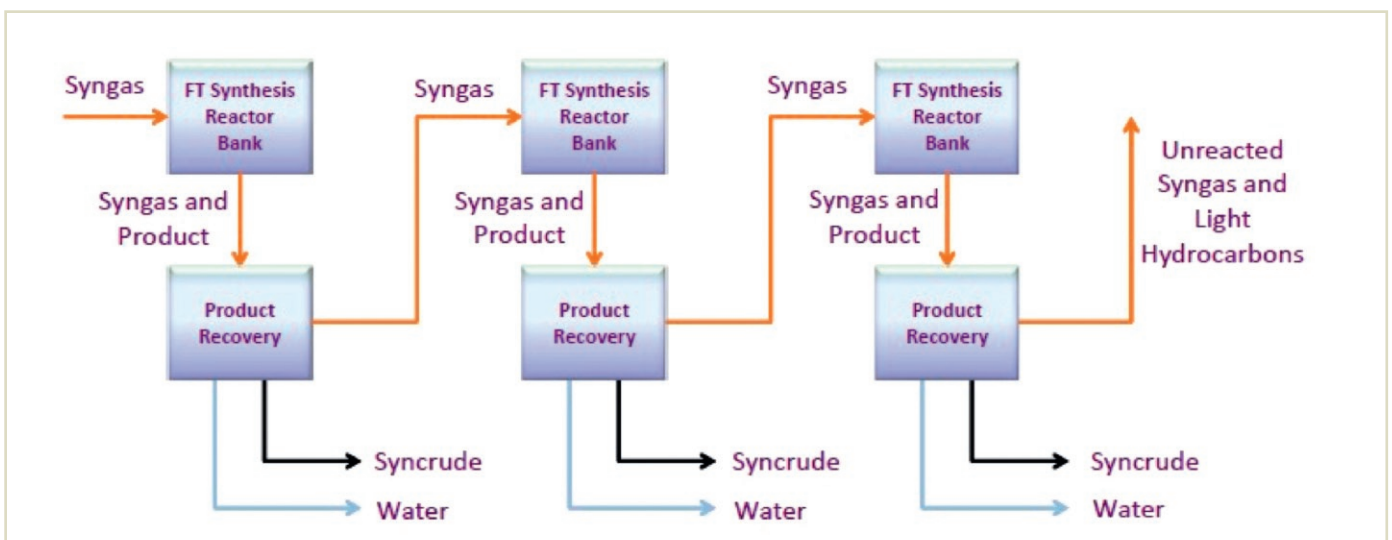


Fig. 6. Block flow diagram of the H&H-FT-process. // Bild 6. Prozessfließbild des H&H-FT-Verfahrens. Source/Quelle: ALF

temperature FT synthesis. This makes the ALF-FT technology distinctly suitable to operate with CO<sub>2</sub>-rich syngases.

Further optimization of the process would lead to an approval as a drop-in aviation fuel in the future. In conventional low-temperature FT method the aromatic content is very low. In this case, the FT product consists almost exclusively of aliphatic, saturated hydrocarbons.

### 5.8 FTS Fischer-Tropsch synthesis and environmental protection

Many of the perceptions around the environmental impact of coal derived liquid fuel is based on dated information. The last 30 years have seen significant advances in the environmental performance of the main Gasification and FT processes. In addition to this, the world view of environmental impact has moved from the confines of the facility to a more global "cradle to grave" assessment. This means that, for so long as we continue to use transportation fuels, we need to take into account all of the carbon impact from the extraction, purification, transportation and usage of the fuel itself. When this is considered, and especially when we incorporate the comprehensive use of CCS&U technologies, a FT process based on the use of local carbon sources becomes environmentally extremely competitive.

## 6 Customer analysis

In principle, every airline and every airport operator is a potential purchaser of synthetic fuels. In addition, municipal transport companies are ideal partners and customers for the uptake of "green" fuels. This uptake would be driven by lower costs, as well as the use of a more environmentally friendly fuel for local public transport, the city economy, hospital operations and the like. This is especially true in the case of small- and medium-scale plants.

Even at this early stage of project development, the authors have secured serious expressions of interest regarding the purchase of the fuels produced.

For the airlines and aireg members, it is particularly important that the planned 10-bpd plant produces relevant quantities of synthetic fuel that can be directly utilised. With regard to the sale of the 10-bpd system's products, it can be assumed that potential customers from the aviation industry will conclude standard supply contracts. Based on the available input costs, the estimated price for the fuel produced by the 10-bpd plant will be in the range of 0.60 €/l kerosene.

## 7 Economy of the 10-bpd-ALF-FT plant

In order to realize the production of synthetic, kerosene on an industrial scale by using the ALF-FT technology, it is necessary to establish the proposed semi-industrial 10-bpd-plant as a first step.

This step is necessary in order to demonstrate the technical feasibility of the production of synthetic fuels based on syngas ("proof of concept"). This proof of concept is the indispensable prerequisite for a commitment of the aviation industry as well as the provision of material to complete the ASTM approval process. Only with the approval of the product "aviation fuel" can a business case be provided for synthetic fuel from an industrial plant.

The industrial project for the production of fully synthetic fuels for the aviation industry is divided into three different project

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die beim ALF-FT-Verfahren verwendeten, neu entwickelten Katalysatoren eine wesentlich höhere Aktivität gegenüber der Wassergas-Shift-Reaktion aufweisen, im Vergleich zu Kobalt-Katalysatoren, die üblicherweise bei der Niedertemperatur-FT-Synthese eingesetzt werden. Diese Tatsache qualifiziert die ALF-FT-Technologie speziell für den Einsatz von CO<sub>2</sub>-reichen Syngasen.

In Zukunft wäre durch eine weiterführende Prozessoptimierung eine Zulassung als Drop-in-fähiger Luftfahrtkraftstoff denkbar. Im konventionellen Niedertemperatur-FT-Verfahren ist der Aromatengehalt sehr gering. In diesem Fall besteht das FT-Produkt fast ausschließlich aus aliphatischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen.

### 5.8 FTS Fischer-Tropsch-Synthese und Umweltschutz

Die Einschätzungen der Umweltauswirkungen von kohlebasierten Kraftstoffen basieren auf zum Teil veralteten Daten. Innerhalb der letzten 30 Jahre wurden auf dem Gebiet der Kohlevergasung und der FT-Synthese signifikante Fortschritte im Umweltschutz erzielt. Zusätzlich hat sich die ökologische Wahrnehmung von einer lokalen Sicht hin zu einer globalen Sicht gewandelt. Dies bedeutet, dass bei der Bewertung der Umweltrisiken der komplette Kohlenstoffausstoß einer vollständigen Prozesskette berücksichtigt werden muss, also beginnend mit der Gewinnung, über Extraktion, Reinigung, Transport, Verarbeitung und Veredlung bis hin zur Verwendung eines Kraftstoffs. Wird dieser Prozessgedanke in Betracht gezogen und vor allem, wenn man den umfassenden Einsatz von CCS&U-Technologien berücksichtigt, kann und wird ein FT-Prozess, der auf der Nutzung lokaler Kohlenstoffquellen basiert, unter Umweltgesichtspunkten extrem wettbewerbsfähig sein.

## 6 Kundenanalyse

Grundsätzlich kommen jede Fluggesellschaft und jeder Flughafenbetreiber als potentielle Abnehmer von synthetischen Kraftstoffen infrage. Darüber hinaus sind insbesondere bei klein- und mittelskaligen Anlagen kommunale Transportunternehmen, Stadtwirtschaftsbetriebe u.a. ideale Partner und Kunden für die Abnahme der „grünen“ Kraftstoffe. Dieser Trend würde durch niedrigere Kosten sowie den Einsatz umweltfreundlicherer Kraftstoffe gesteigert werden.

Zum gegenwärtigen frühen Zeitpunkt der Projektentwicklung liegen den Autoren bereits ernsthafte Interessensbekundungen über die Abnahme der produzierten Kraftstoffe vor.

Für die Fluggesellschaften und aireg-Mitglieder ist es besonders wichtig, dass mit der vorgesehenen 10-bpd-Anlage relevante Mengen an synthetischem Kraftstoff erzeugt werden, die direkt vertankt werden können („drop-in-fuel“). Bei dem Absatz der Produkte aus dieser Anlage kann davon ausgegangen werden, dass die potentiellen Kunden aus der Luftfahrtindustrie normale Lieferverträge abschließen werden. In Abhängigkeit von den Kosten der Rohstoffbereitstellung liegen die Kosten für den produzierten Kraftstoff der 10-bpd-Anlage in der Größenordnung von 0,60 €/l Kerosin.

## 7 Ökonomie der 10-bpd-ALF-FT-Anlage

Um die Produktion von synthetischem Kerosin im industriellen Maßstab mittels der ALF-FT-Technologie realisieren zu können,

phases (Figure 7). The fundamental milestones are color-coded. Subject to any permitting delays, the process for the development of a commercial facility could be completed within 60 months from the start of the project.

The completion of the first phase “proof of concept” requires a period of 24 months. This phase includes basic engineering, detailed engineering, approval planning, financing, construction and commissioning.

The proposed 10-bpd-plant can produce approximately 1,600 liter of liquid fuel product per day under standard conditions. Depending on the plant configuration and the process management, two main product lines are technical feasible. These focus on either a fuel or chemicals focus. In the fuel focus, the primary products are either diesel or kerosene, while in the chemical focus the primary product is chemical precursors and FT waxes. Subject to the desired products, the process can be adjusted to maximise the desired product. This means that, after the successful proof of concept, the plant can be adjusted either for the production of diesel/kerosene or basic chemicals subject to the secured offtake agreements and preferential pricing.

The evaluation of local conditions, available technologies as well as the specific market environment in Germany, has shown that the semi-industrial 10-bpd-plant can be established and operated economically under certain conditions over the projected lifetime of 20 years. The baseline scenario is based on revenues of 60 ct/l for synthetic kerosene. The revenues for base chemicals (wax) depend on the quality. The price ranges from 0.80 to 1.50 €/kg for industrial chemicals up to over 8 to 10 €/kg for semi-finished wax products (lubricants). These figures and prices are based on the results of specific discussions with potential customers.

The controlling factor in the business model, besides the sales opportunities, is the cost of the feedstock for the syngas production. While in principle any carbon source can be used as a feedstock for the syngas production, the different processes have different capital and operating costs which all have to be taken into account in determining the final implementation.

ist als erster Schritt die Errichtung der vorgeschlagenen semi-industriellen 10-bpd-Anlage unabdingbar. In diesem Schritt soll der Nachweis der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit der Produktion von synthetischen Kraftstoffen auf der Basis von Synthesegas erbracht werden (proof of concept). Der Nachweis der Produktion von synthetischem Kraftstoff ist die Voraussetzung für die Zulassung des neuen Kraftstoffs durch die Zulassungsstelle ASTM. Erst mit der Zulassung des Produkts „Kraftstoff“ ist ein Business Case für die Luftfahrtindustrie beim Einsatz synthetischer Kraftstoffe gegeben.

Das industrielle Projekt zur Herstellung vollsynthetischer Kraftstoffe für die Luftfahrtindustrie untergliedert sich in drei Projektphasen (Bild 7). Die entscheidenden Meilensteine sind farblich markiert. Vorbehaltlich etwaiger Verzögerungen bei der Genehmigung könnte der Prozess zur Entwicklung einer kommerziellen Anlage innerhalb von 60 Monaten nach Projektbeginn abgeschlossen werden. Für die Realisierung der Phase 1 „proof of concept“ mit den Etappen Basic Engineering, Detailed Engineering, Genehmigungsplanung, Finanzierung, Aufbau der Anlage und Testbetrieb wird insgesamt ein Zeitraum von 24 Monaten veranschlagt.

Die 10-bpd-Anlage kann unter Standardbedingungen ca. 1.600 l/d FT-Produkt erzeugen. Je nach Konfiguration der Anlage und Management der Prozessführung sind zwei Hauptproduktlinien technisch umsetzbar. Diese konzentrieren sich entweder auf die Herstellung von Kraftstoffen mit den Hauptprodukten Diesel und Kerosin oder Basis-Chemikalien (FT-Wachse). Je nach den gewünschten Produkten kann der Prozess angepasst werden, um den Ertrag des gewünschten Produkts zu optimieren. Das bedeutet, dass die Anlage – nach dem proof of concept für die Herstellung des synthetischen Kerosins – grundsätzlich so eingestellt werden kann, dass sie in Abhängigkeit von den gesicherten Abnahmeverträgen als Produktionsanlage für die Herstellung von Diesel-Kerosin oder Basischemikalien angepasst werden kann.

Im Zug der Evaluierung von Standortvoraussetzungen und in Deutschland verfügbarer Technologie sowie des konkreten Marktumfelds hat sich gezeigt, dass bereits die semi-industrielle

Anlage mit einer Kapazität von 10 bpd unter bestimmten Voraussetzungen mit guten wirtschaftlichen Ergebnissen errichtet und über die geplante Lebenszeit von 20 Jahren betrieben werden kann. Das Basisszenario geht dabei von Erlösen für das synthetische Kerosin von 60 ct/l aus. Für die chemischen Grundstoffe (Basischemikalien, Wachs) können sehr unterschiedliche Erlöse erzielt werden. Die Preise reichen von 0,80 bis 1,50 €/kg für Basischemikalien im industriellen Maßstab über 8 bis 10 €/kg für höhere Qualitäten (Schmierstoffe, Hartwachs). Diese Zahlen und Preise beruhen auf den Ergebnissen konkreter Gespräche mit potentiellen Abnehmern der Produkte.

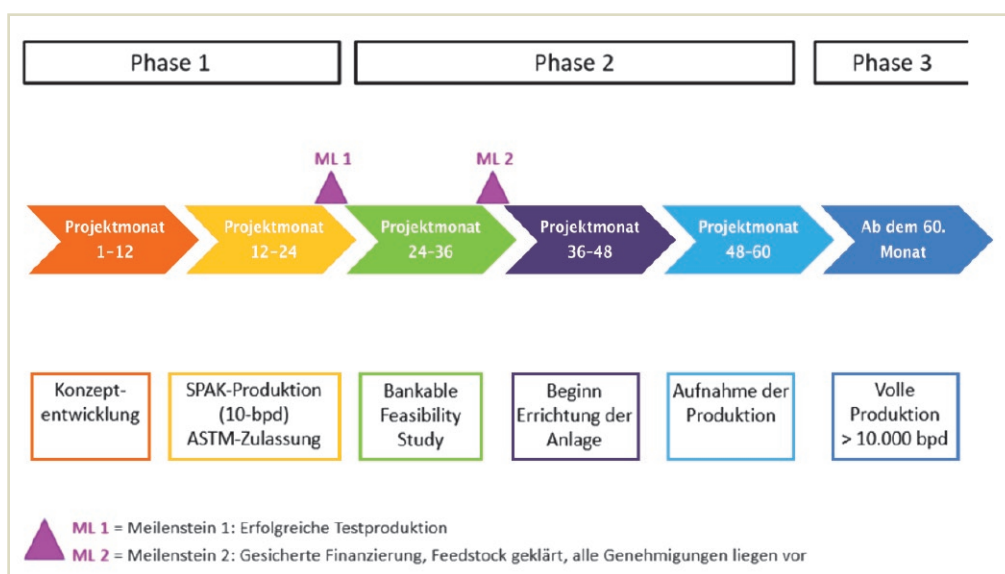


Fig. 7. Time frame for erection and operation of the 10-bpd-plant as well as for the industrial plant. Bild 7. Überblick über den geplanten Zeitrahmen sowohl für die 10 bpd-Anlage (Phase 1) als auch für die Errichtung und den Betrieb einer industriellen Anlage. Source/Quelle: ALF



The developed financial model is based on a highly automated plant to minimise the manpower requirements, 24/7 operation with a 90% availability and an operational lifetime of 20 years. The finance model is based on external financing on an equity investor basis. The economic model considers various feedstock costs including biomethane and natural gas at costs of 0.062 €/kWh for Biomethane and between 0.017 to 0.025 €/kWh for natural gas.

The capital and erection costs are based on preliminary sizing and actual costing from reputed German manufacturers with experience in these areas.

## 8 Prospect: Project of an industrial scale plant

The present feasibility study focuses on the construction and operation of a semi-industrial 10-bpd-FT plant. This plant has exactly one objective: to demonstrate that the new developed ALF-FT process can produce economical and environmentally friendly alternative synthetic fuel ("proof of concept").

Only if this proof is successful, further considerations for the construction of industrial plants with capacities of more than 10,000 bpd are realistic.

Independently of this fact, the project partners CCS GmbH and Holland & Hausberger (Pty.) Ltd. from their own project developments, have the necessary know-how for a promising project planning of industrial FT plants.

By March 2018, the authors will have completed the pre-engineering for the construction of a 1,500-bpd carbon-to-liquid plant in Asia. Anthracite is proposed to be used as the main carbon carrier. However, the plant design allows for the flexibility to process synthetic gas of different origins (primarily biomass and biomethane).

Although the planning of an industrial FT plant for the production of fuels based on synthesis gas in Germany is still in the future, the further pursuit of this project approach makes sense in principle, as initial economic considerations indicate.

ALF UG has commissioned an independent price estimation for customers in Germany on the basis of lignite. The financial model has yielded a product-on price of 0,51 €/l kerosene, which is competitive with a reference price for kerosene of currently 0,60 €/l kerosene. Production costs can be reduced even further if other gaseous carbon carriers are used as feedstock for the synthesis gas.

Kontrollierender Faktor im Business Modell, abgesehen von den Absatzmöglichkeiten, sind die Preise für die Ausgangsstoffe zur Erzeugung des erforderlichen Synthesegases. Während prinzipiell jede Kohlenstoffquelle als Ausgangsstoff für die Synthesegaserzeugung dienen kann, haben die verschiedenen Prozesse unterschiedliche Investitions- und Betriebskosten, die bei der endgültigen Umsetzung eines Projekts zu berücksichtigen sind.

Das entwickelte Finanzmodell basiert auf einer hochautomatisierten Anlage zur Minimierung des Personalbedarfs, einem 24/7-Betrieb mit 90% Verfügbarkeit und einer Betriebsdauer von 20 Jahren.

Die Finanzierung erfolgt über Fremdkapital. Das ökonomische Modell berücksichtigt die Kosten für unterschiedliche Kohlenstoffträger, einschließlich Biomethan und Erdgas. Dabei ergeben sich Kosten von 6,2 ct/kWh bei der Nutzung von Biomethan und 1,7 bis 2,5 ct/kWh bei Erdgas. Die Investkosten für die Errichtung der FT-Anlage wurden auf der Grundlage von realen Kostenangaben deutscher Anlagenbauer ermittelt.

## 8 Ausblick: Projekt einer industriellen Großanlage

Die bisherigen Machbarkeitsstudien der Autoren konzentrieren sich in Deutschland auf die Errichtung und den Betrieb einer semi-industriellen 10-bpd-FT-Anlage. Diese hat genau ein Ziel: den Nachweis zu erbringen, dass mit dem neu entwickelten ALF-FT-Verfahren wirtschaftlich und umweltfreundlich alternativer synthetischer Kraftstoff erzeugt werden kann (proof of concept). Nur wenn dieser Nachweis gelingt, sind weitergehende Überlegungen zur Errichtung von industriellen Anlagen mit Kapazitäten größer 10.000 bpd überhaupt realistisch.

Unabhängig davon verfügen die Autoren aus eigenen Projektentwicklungen über das erforderliche Know-how für eine erfolgversprechende Projektplanung industrieller FT-Anlagen. Im März 2018 werden die Autoren das „Pre-Engineering“ für die Errichtung einer 1.500-bpd-Ctl-Anlage in Asien erfolgreich abschließen. Als Hauptkohlenstoffträger ist hier Anthrazit vorgesehen. Jedoch wird die Anlage so geplant, dass sie Synthesegas unterschiedlicher Herkunft – vor allem Biomasse und Biomethan – mitverarbeiten kann.

Auch wenn zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Planung einer industriellen FT-Anlage zur Erzeugung von Kraftstoffen auf der Basis von Synthesegas in Deutschland noch in der Zukunft liegt, ergibt die weitere Verfolgung dieses Projektansatzes grundsätzlich Sinn, wie erste ökonomische Betrachtungen erkennen lassen.

ALF UG hat eine unabhängige Preiseinschätzung für Kunden in Deutschland auf Basis einheimischer Braunkohle in Auftrag gegeben. Das Finanzmodell hat einen Produktionspreis von 0,51 €/l Kerosin ergeben, der bei einem Referenzpreis für Kerosin von gegenwärtig 0,60 €/l wettbewerbsfähig ist. Die Herstellungskosten können noch einmal deutlich reduziert werden, wenn als Feedstock für das Synthesegas andere gasförmige Kohlenstoffträger genutzt werden.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) Elsen, R. O.; Overhoff, U.; Wolf, K. J.: Möglichkeiten und Chancen der Braunkohle jenseits des Strommarktes. *World of Mining* (67), 2015.
- (2) Maaßen, U.; Schiffer, H.-W.: Die deutsche Braunkohlenindustrie im Jahr 2015. *Mining Report Glückauf* (152) Heft 3, 2016, S. 259–269.
- (3) Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.: Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2015. Retrieved 03 14, 2017, from [http://www.kohlenstatistik.de/files/silberbuch\\_2015.pdf](http://www.kohlenstatistik.de/files/silberbuch_2015.pdf).
- (4) Schiffer, H.-W.: Beitrag der Kohle zur Sicherung der Energieversorgung in Regionen der Welt. *World of Mining* (6) November/Dezember 2016, S 357–368.
- (5) Harrison III, W. E.: The Role of Fischer Tropsch Fuels for the US Military. Präsentation. Air Force research Laboratory, 2006.
- (6) van den Berg, G.: Braunkohle aus dem Feuer holen! *chemie&more*, April 2015.
- (7) Kraft, H.: Kampf um die Kohle. *Handelsblatt*, 22. Januar 2016.
- (8) Högner, J.; Hufschmidt, M.; Landtag NRW: Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren (Stand: April 2015 ed.). Düsseldorf.
- (9) ICAO: (2010). Aviation Outlook. 2010. Retrieved 04 04, 2017, from [http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO\\_EnvReport10-Outlook\\_en.pdf](http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO_EnvReport10-Outlook_en.pdf).
- (10) BMVI: Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2015.
- (11) Hochfeld, C.: Alternative Kraftstoffe Welche Kraftstoffe könnten zur Reduzierung der Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen führen? Berlin, 21.04.2016.
- (12) IATA: Press Release No.: 26, 2009. Bold Industry Commitment on Environment. Retrieved 04 04, 2017, from <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2009-06-08-03.aspx>.
- (13) IATA: Annual report 2011. Singapur, 2012.
- (14) ATAG, A.: Reducing emissions from aviation through carbon-neutral growth from 2020. 2013. Retrieved 06 27, 2016, from <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/atag-paper-on-cng2020-july2013.pdf>.
- (15) DLR, 2014. Retrieved 04 04, 2017, from [http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151\\_read-10228/#/gallery/14652](http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-10228/#/gallery/14652).
- (16) DECHEMA e.V.: Positionspapier: Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe: Für Klimaschutz im globalen Rohstoffwandel. Frankfurt am Main: ProcessNet-Arbeitsausschuss „Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe“, Juli 2017.
- (17) Diercks, T. (2016). Rohstoffland Deutschland. Berlin: Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V.
- (18) Unruh, D.; Rohde, M.; Schaub, G.: Fischer-Tropsch Synthese von Kohlenwasserstoffen ausgehend von Biomasse – In-situ H<sub>2</sub>O-Abscheidung und Verbesserung der Kohlenstoffnutzung. *FVS*, 2003.
- (19) National Energy Technology Laboratory: Fischer-Tropsch Synthesis. 2016. Retrieved November 2016, from <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis>.
- (20) Fedou, S.; Caprani, E.; Douziech, D.; Boucher, S.: Conversion of syngas. *Axens*, 2008.
- (21) Hecquet, M.: BioTfuel-Acatech seminar. Berlin, 2016.
- (22) Total: BioTfuel: Converting plant waste into fuel. 2016. Abgerufen am 15. 11 2016 von <http://www.total.com/en/energy-expertise/projects/bioenergies/biotfuel-converting-plant-wastes-into-fuel>.
- (23) Viguié, J.-C.; Ullrich, N.; Porot, P.; Bournay, L.; Hecquet, M.; Rousseau, J.: BioTfuel Project: Targeting the Development of Second-Generation Biodiesel and Biojet Fuels. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 68 (5) 2013, pp. 935 – 946.
- (24) Kurier.at.: Ein Barrel Treibstoff pro Tag und Holz gewonnen. 2016. Retrieved 04 27, 2017, from <https://kurier.at/chronik/burgenland/ein-barrel-treibstoff-pro-tag-aus-holz-gewonnen/232.188.822>.
- (25) bioenergy2020+: Die mobile Zukunft – Diesel aus Holz. 2016. Retrieved 04 27, 2017, from <https://www.bioenergy2020.eu/content/news/archiv/view/240>.
- (26) Deutsche Wirtschafts Nachrichten: Durchbruch: Audi stellt Diesel aus CO<sub>2</sub> und Wasser her. 2015.
- (27) Audi AG: Sprit der Zukunft: Forschungsanlage in Dresden produziert erste Menge Audi e-diesel. 21.04.2015. Retrieved 03 20, 2017, from <https://www.audi-mediacycenter.com/de/pressemitteilungen/sprit-der-zukunft-forschungsanlage-in-dresden-produziert-erste-menge-audi-e-diesel-352>.
- (28) Hausberger, B.; Juch, A.; Holland, S.; Schwarz, R.: Clean Jet Fuel made by a newly developed Fischer-Tropsch Technology: Innovative, effective and environmentally friendly. 8th International Freiberg Conference on IGCC & xTL Technologies, 12-15.06.2016. Köln.
- (29) Meyer, B.: Technologiebewertung Fischer-Tropsch-Synthesetechnologie von Holland & Hausberger. Freiberg, 2016a.
- (30) Power-to-X-Allianz: Eckpunktepapier für ein Markteinführungsprogramm von Power-to-X-Technologien. Vorschlag für ein Innovations-Förderprogramm mit Fokus auf PtX-Anwendungen im Mobilitätssektor, Oktober 2017.

## Authors / Autoren

Dr. Rüdiger Schwarz, Dr. Craig Griffiths, Dr. Brendon Hausberger, Dr. Simon Holland, Axel Juch, Rebecca Reiche, ALF Advanced Liquid Fuel UG, Berlin