



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

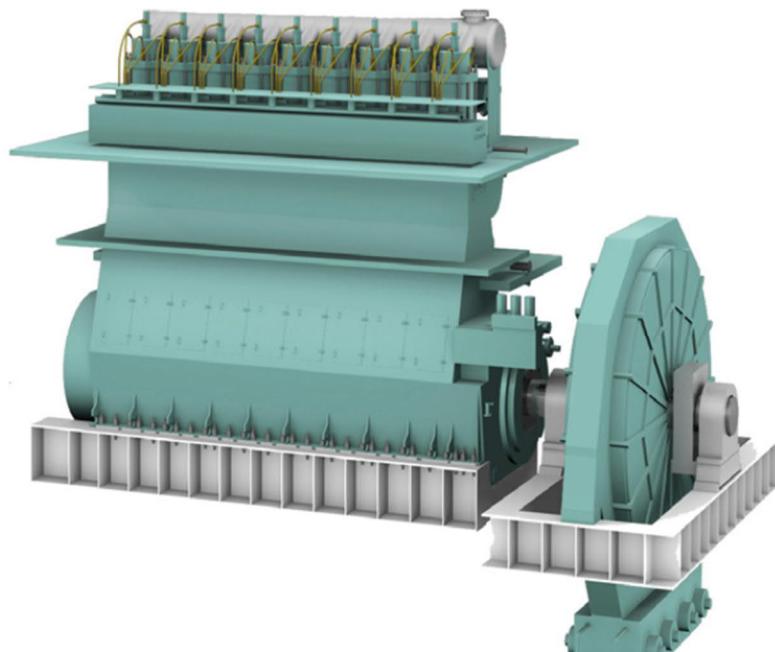
**Schlussbericht vom 7. Dezember 2020**

---

## **ECSES**

### Engine-produced, Clean Swiss Energy from 2-Stroke Engines

---



**Datum:** 07.12.2020

**Ort:** Winterthur

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfängerin:**

Winterthur Gas & Diesel AG  
Schützenstrasse 1-3  
CH-8401 Winterthur  
[www.wingd.com](http://www.wingd.com)

**Autoren:**

Dr. Matthias Stark, Winterthur Gas & Diesel AG,  
Dr. Andreas Schmid, Winterthur Gas & Diesel AG,  
Thomas Würms, Valoya Ingenieursdienstleistungen,  
Ioannis Sklias, Winterthur Gas & Diesel AG,  
[matthias.stark@wingd.com](mailto:matthias.stark@wingd.com)  
[andreas.schmid@wingd.com](mailto:andreas.schmid@wingd.com)  
[thomas.wuerms@valoya.ch](mailto:thomas.wuerms@valoya.ch)  
[ioannis.sklias@wingd.com](mailto:ioannis.sklias@wingd.com)

**BFE-Bereichsleitung:**

Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmleitung:**

Stephan Renz, [renz.btr@swissonline.ch](mailto:renz.btr@swissonline.ch)

**BFE-Vertrags- / Bestellnummer:**

SI/501783 / 810006154

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

# Zusammenfassung

Die Energiestrategie 2050 (ES 2050) der Schweizer Regierung führt mittelfristig zu grossen Veränderungen in der Schweizer Energielandschaft. In der daraus entstandenen Diskussion über die zukünftige Strom- und Wärmeversorgung der Schweiz bietet sich daher die Möglichkeit den sinnvollen Einsatz von thermischen Energieerzeugern zur Schliessung möglicher Lücken in der Energieversorgung genauer zu betrachten. Durch die geplante Stilllegung von Atomkraftwerken (AKW) stellt sich auch die Frage nach der Versorgung der oftmals angehängten Fernwärmennetze. Eine Möglichkeit der Versorgung bieten grosse, auf marinen Zweitaktmotoren basierende WKK-Anlagen.

Die kostengünstige Konstruktion eines robusten und flexiblen Aggregats verbunden mit günstigen Investitions- und niedrigen Wartungskosten lässt sich sehr gut in die bestehende Energielandschaft integrieren. Mit Stromgestehungskosten von 4.1 Rp/kWh, resp. -konvertierungskosten von 1.8 Rp/kWh ist ein solches Kraftwerk im Vergleich zu ähnlichen Technologien selbst mit konventionellen Energieträgern konkurrenzfähig. Der Aspekt der Brennstoffflexibilität ist ein wichtiger Bestandteil dieser Untersuchung. Aufgrund ihrer Herkunft und Geschichte sind marine Zweitaktmotoren sehr genügsam und stellen relativ einfache Ansprüche an die Brennstoffqualität. Ein grosser Vorteil langsamlaufender Zweitaktmaschinen ist daher die Möglichkeit, eine breite Varianz von Brennstoffformen und -qualitäten zu verwerten. Die Möglichkeit ein solches Kraftwerk gleichzeitig oder alternierend mit flüssigen und gasförmigen Brennstoffen zu betreiben, ist besonders hervorzuheben. Neben den klassischen fossilen oder biogenen Brennstoffen bieten sich verschiedene Abfallströme aus der Industrie an, wie z.B. Lösungsmittel oder Fette und Öle. Diese werden heutzutage mit deutlich geringerem Wirkungsgrad entsorgt. Eine Zweitakt WKK-Anlage könnte dabei unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, flüssige Abfälle sauber und effizient entsorgen und diese darüber hinaus in elektrische und thermische Energie umwandeln.

Eine auf dieser Technologie basierende WKK-Anlage bietet zudem die Möglichkeit, biogene sowie synthetische Brennstoffe in einem früheren Stadium der Herstellung zu verwenden. Für Viertaktmotoren oder Turbinen müssen Brennstoffe mit hoher Reinheit und spezifischen Brennstoffeigenschaften hergestellt werden, dies mittels energieaufwändiger Prozesse. Einige kosten- und energieintensive Schritte könnten bei der Anwendung in einer Zweitaktmaschine entfallen, was die "well-to-grid"-Betrachtung positiv beeinflusst.

## Résumée

La stratégie énergétique 2050 du gouvernement suisse (ES 2050) entraînera des changements majeurs dans le paysage énergétique suisse à moyen terme. La discussion qui en résulte sur l'approvisionnement futur en électricité et en chaleur de la Suisse offre donc l'occasion d'examiner de plus près l'utilisation judicieuse des générateurs d'énergie thermique pour combler d'éventuelles lacunes dans l'approvisionnement énergétique. Le démantèlement prévu des centrales nucléaires soulève également la question de l'alimentation des réseaux de chauffage urbain qui y sont souvent rattachés. Une possibilité d'approvisionnement est offerte par les grandes centrales de cogénération basées sur des moteurs marins à deux temps.

La conception rentable d'une unité robuste et flexible, combinée à un investissement favorable et à de faibles coûts de maintenance, peut très bien s'intégrer dans le paysage énergétique existant. Avec des coûts de production d'électricité de 4,1 centimes/kWh, respectivement des coûts de conversion de 1,8 centime/kWh, une telle centrale est compétitive par rapport à des technologies similaires, même avec des sources d'énergie conventionnel.

L'aspect de la flexibilité du carburant est un élément important de cette étude. En raison de leur origine et de leur histoire, les moteurs marins à deux temps sont très économies et leurs exigences en matière de qualité du carburant sont relativement simples. Par conséquent, l'un des principaux avantages des moteurs à deux temps à rotation lente est la possibilité d'utiliser une grande variété de formes et de qualités de carburant, ce qui ouvre une variété de carburants potentiels. La possibilité d'exploiter une telle centrale simultanément ou en alternance avec des combustibles liquides et gazeux souligne ce potentiel. Outre les combustibles fossiles ou biogènes classiques, divers flux de déchets industriels, tels que les solvants ou les graisses et les huiles, sont également adaptés. Ces derniers sont aujourd'hui éliminés avec une efficacité nettement moindre. Une centrale de cogénération à deux temps pourrait éliminer les déchets liquides de manière propre et efficace tout en respectant les limites d'émission et, en outre, les convertir en énergie électrique et thermique.

Une centrale de cogénération basée sur cette technologie offre également la possibilité d'utiliser des combustibles biogènes et synthétiques à un stade plus précoce de la production. Pour les turbines ou moteurs à quatre temps, il faut produire des carburants d'une grande pureté et aux propriétés spécifiques, en utilisant des procédés à forte intensité énergétique. Certaines étapes coûteuses et énergivores pourraient être omises lorsqu'elles sont utilisées dans un moteur à deux temps, ce qui influence positivement la considération du "well-to-grid".

# Abstract

The Swiss government's Energy Strategy 2050 (ES 2050) will lead to major changes in the Swiss energy landscape in the medium term. The resulting discussion about Switzerland's future electricity and heat supply therefore offers the opportunity to take a closer look at the sensible use of thermal energy generators to close possible gaps in the energy supply. The planned decommissioning of nuclear power plants (NPPs) also raises the question of how to supply the district heating networks that are often attached to them. One possibility for supply is offered by large CHP plants based on marine two-stroke engines.

The cost-effective construction of a robust and flexible unit combined with favourable investment and low maintenance costs can be integrated very well into the existing energy landscape. With electricity generation costs of 4.1 Rp/kWh and conversion costs of 1.8 Rp/kWh, such a power plant is competitive compared to similar technologies, even with conventional energy sources.

The aspect of fuel flexibility is an important component of this study. Due to their origin and history, marine two-stroke engines are very frugal and have relatively simple fuel quality requirements. A major advantage of slow speed two-stroke engines is therefore the ability to utilise a wide variance of fuel forms and qualities. The possibility of operating such a power plant simultaneously or alternately with liquid and gaseous fuels is to be particularly emphasised. In addition to the classic fossil or biogenic fuels, various waste streams from industry, such as solvents or fats and oils, are also suitable. Nowadays, these are disposed of with significantly lower efficiency. A two-stroke CHP plant could dispose of liquid waste cleanly and efficiently while complying with emission limits and convert it into electrical and thermal energy.

A CHP plant based on this technology also offers the possibility of using biogenic as well as synthetic fuels at an earlier stage of production. For four-stroke engines or turbines, fuels with high purity and specific fuel properties must be produced, using energy-intensive processes. Some cost- and energy-intensive steps could be omitted when used in a two-stroke engine, which positively influences the well-to-grid consideration.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	7
2	WKK Entwicklungen – Global und in der Schweiz.....	8
3	Rahmenbedingungen zum Betrieb einer Gross-WKK-Anlage.....	9
3.1	Lärmemissionen .....	9
3.2	Schwingungen .....	9
3.3	Emissionen.....	10
3.4	Brennstoffe .....	11
4	Der Zweitaktmotor als WKK-Anlage.....	11
4.1	Das Niederdruck Gas Konzept.....	14
4.2	Der Betrieb des Zweitakt Dual Fuel Motors.....	15
5	Brennstoffe.....	16
5.1	Brennstoffklassen .....	16
5.2	Potenzielle Brennstoffe .....	17
6	Simulation zur thermodynamischen Analyse einer Zweitakt WKK-Anlage .....	21
6.1	Entwicklung des Motormodells .....	22
6.1.1	Abgleich im Dieselbetrieb mit Marine Diesel Oil (MDO).....	22
6.1.2	Abgleich im Gasbetrieb mit Liquified Natural Gas (LNG).....	24
6.2	ECSES 12X62DF-Modellerweiterung und -anwendung .....	25
6.2.1	Diesel Betrieb.....	26
6.2.2	Gas Betrieb.....	27
6.3	Modell zur Abschätzung der Abwärme Rückgewinnung.....	29
6.3.1	ORC – «Organic Rankine Cycle» .....	29
6.3.2	Gesamtwirkungsgrad – Nutzung der Restenthalpie und Anergie.....	31
6.4	Emissionen: .....	34
7	Vergleich zwischen GUD und Zweitakt betriebener WKK.....	35
7.1	Effizienz.....	35
7.2	Flexibilität.....	36
7.3	Investitions- und Wartungskosten von WKK-Anlagen .....	39
7.4	WKK im Kontext der Elektrizitätserzeuger .....	40
8	Anwendungsbeispiel: REFUNA .....	41
8.1	Konzeptueller Ansatz .....	42
8.2	Wirtschaftlichkeit REFUNA mit ECSES WKK-Anlage.....	43
8.3	Wirtschaftliche Effekte potenzieller Brennstoffe .....	45
9	Fazit.....	46
10	Abkürzungen .....	47
11	Referenzen.....	48
12	Anhang.....	50

## 1 Einleitung

Die Energiestrategie 2050 (ES 2050) der Schweizer Regierung führt mittelfristig zu grossen Veränderungen im Schweizer Energiesystem und der Energielandschaft. Die drei Hauptpfeiler der ES 2050 sind:

- Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung
- Steigerung der Energieeffizienz
- Wegfall der Kernenergienutzung

Durch die geplante Stilllegung der Kernkraftwerke stellt sich die Frage nach der Versorgung der betreffenden Fernwärmesysteme. Eine sehr flexible und effiziente Möglichkeit bieten die hier untersuchten Zweitakt-Gross-WKK-Anlagen.

In der momentanen Diskussion über die zukünftige Strom- und Wärmeversorgung der Schweiz bietet sich die Möglichkeit, diese Alternative genauer zu betrachten und vorzustellen: Den Einsatz von thermischen Energieerzeugern basierend auf erneuerbaren Brennstoffen zur Schliessung möglicher Lücken in der Energieversorgung. Als thermische Energieerzeuger werden Anlagen bezeichnet, welche aus chemischen Energieträgern über Verbrennungsprozesse Strom und Wärme erzeugen. Eine effiziente, ökologisch wie ökonomisch interessante Variante solch einer thermischen Anlage sind Wärmekraft-Kopplungs-Anlagen (WKK), auch bekannt unter dem Begriff Blockheizkraftwerke (BHKW). Um als Wärmekraft-Kopplungs-Anlage bezeichnet werden zu dürfen, muss bei einem Gesamtwirkungsgrad von mindestens 60% mindestens 5% der eingesetzten Energie in Elektrizität umgewandelt werden [1]. Im Vergleich zur getrennten, thermischen Erzeugung von Wärme und Strom erreichen WKK-Anlagen höhere Gesamtwirkungsgrade und damit einen geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Voraussetzung hierfür ist die optimierte Nutzung der verschiedenen Energieströme. WKK-Anlagen sind in ihrer Ausführung meist dezentral. Aufgrund ihrer vermehrten Nutzung während der Wintermonate können sie die zu dieser Zeit reduzierten Erträge von Strom und Wärme aus Solarenergie teilweise kompensieren und bieten damit eine sehr gute Ergänzung zur Photovoltaik. Sie leisten darüber hinaus einen wichtigen Beitrag zur Stabilität lokaler Verteilnetze und zur Versorgungssicherheit. Anhand der hier durchgeföhrten Studie sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie verhält sich ein grosser, als WKK-Anlage betriebener Zweitaktmotor im Vergleich zu gängigen WKK-Anlagen?
- Wie könnte eine solche WKK-Anlage in der Schweiz eingesetzt werden?
- Welche Brennstoffe könnten dazu eingesetzt werden?
- Wie gestaltet sich die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage?

Bei WKK Anwendungen stehen derzeit Kombi-Kraftwerke (Gas- und Dampfturbinen kombiniert, GUD) und mit Gas- oder Dieselmotoren betriebene Anlagen in verschiedenen Größenordnungen im Vordergrund. In dieser Untersuchung soll nun geklärt werden, wie sich ein grosser Zweitaktmotor in die bestehende Energielandschaft integrieren liesse.

## 2 WKK Entwicklungen – Global und in der Schweiz

Die globale WKK-Kapazität stieg von 456.4 Gigawatt (GW) im Jahr 2006 auf 864.2 GW im Jahr 2018 bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate, CAGR) von 5.5% [2]. Ein wesentlicher Teil dieses Wachstums entfiel auf die Kapazitätserweiterung in Russland, China, Indien, Deutschland und Brasilien. Auch im Zeitraum 2019 – 2025 wird ein deutliches Kapazitätswachstum erwartet, wenn auch mit einer langsameren Rate von 2.8%. Der grösste Teil der Kapazitätserweiterung in diesem Zeitraum wird auf China und Indien geschätzt. China plant, bis 2020 mehr als 12 GW Biomasse-WKK Kapazität und bis 2035 Biomasse-WKK-Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 25 GW hinzuzufügen.

Die WKK-Anlagenkapazität in China stieg von 79.8 GW im Jahr 2006 auf 347.6 GW im Jahr 2018 bei einer CAGR von 13.0% deutlich an. Mehr als 90% der gesamten installierten Kapazität werden derzeit jedoch mit Kohle gespiesen. China fügte mehr neu installierte WKK-Kapazitäten hinzu als der Rest der Welt, was die Rolle des Landes bei der globalen Entwicklung von WKK-Anlagen stärkt. Für den Zeitraum 2019-2025 wird ein Anstieg Chinas von 363.3 GW auf 434.4 GW bei einer CAGR von 3.0% erwartet [2].

Der asiatisch-pazifische Raum wird aufgrund des Anstiegs von WKK Installationen voraussichtlich der grösste Markt bleiben, angeführt von Ländern wie China, Indien und Japan. Die Regierungen in dieser Region setzen sich nachdrücklich für einen saubereren Energiemix ein und unterstützen die Entwicklung solcher Technologien durch verschiedene politische Massnahmen und Forschung [2]. Diese Studie nimmt die energiepolitischen und reglementarischen Randbedingung der Schweiz um eine solche Anlage zu bewerten, wie hier ersichtlich geht aber das weltweite Marktpotential weit darüber hinaus.

Im Jahr 2018 wurden in der Schweiz insgesamt 67'558 GWh Elektrizität erzeugt. Davon stammen 3'727 GWh, also rund 5.5 % von thermischen Stromerzeugern (ohne Kernkraftwerke). 2018 haben rund 950 Anlagen zur thermischen Stromproduktion beigetragen. Diese werden in die Gruppen Klein-WKK (856 Anlagen) und Gross-WKK (42 Anlagen) unterteilt. Gesamthaft sind heute 940 MW elektrische Leistung in thermischen Stromerzeugern installiert. Alle WKK-Anlagen zusammen steuern 496 MW bei, davon stammen rund 72 % von Gross-WKK-Anlagen. Hiervon sind rund 165 MW von Dampfturbinen, die den grössten Anteil ausmachen. Bezogen auf die elektrische Leistung bewegt sich ECSES mit einem Leistungsbereich um die 15 bis 20 MW also in einer Grössenordnung, in der schweizweit nur wenige WKK-Anlagen existieren [1].

Die leitungsgebundene Wärmeversorgung im Zusammenspiel mit WKK-Anlagen ist ein weiterer wichtiger Bestandteil des Energieversorgungssystems. Um den Erfordernissen klima- und energiepolitischer Vorgaben gerecht zu werden, muss jedoch ein grundlegendes Umdenken der überwiegend auf fossilen Brennstoffen basierenden Wärmeversorgung erfolgen. Die Steigerung der Energieeffizienz und die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sind Eckpunkte einer solchen Politik. Die Ziele erfordern nicht nur in der Stromversorgung ein generelles Umdenken, sondern auch einen entsprechenden Umbau der Wärmeversorgung. Während bei der Integration erneuerbarer Energien in die Stromversorgung bereits deutliche Erfolge erzielt werden konnten, hinkt die Energiewende im Bereich der Wärmeversorgung hinterher,

sowohl hinsichtlich des Ziels einer Reduktion der Energienachfrage als auch beim Ziel einer Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung [3].

Die Verteilung der Energie kann in Städten und Regionen mit hoher Dichte an Verbrauchern über Fernwärmenetze geschehen. Schweizweit das grösste Netz betreibt die [REFUNA](#). Dieses bezieht seine Energie zum Grossteil aus der Abwärme vom AKW Beznau. Eine relativ neue Form von Wärmennetzen stellen sogenannte Anergienetze dar. Diese bieten die Möglichkeit ein Wärmennetz mit niedrigen Temperaturen zu betreiben. Die Nutzung dieser Niedertemperaturnetze erfolgt mittels Wärmepumpen beim Wärmekunden, welcher die Vorlauf-Temperatur damit auf das gewünschte Niveau anhebt. Umgekehrt erlauben die niedrigen Vorlauf-Temperaturen auch eine direkte Kühlung beim Endkunden während der Sommermonate [4]. Eine Übersicht bestehender oder sich in Entstehung befindlicher Anergienetze wird in einer Zusammenfassung der Energie Schweiz vorgestellt [5].

Mit der hier untersuchten Zweitakt WKK-Anlage lassen sich in Kombination mit Fernwärm- und Anergienetzen gezielt Wärmeströme nutzen. Während ein Grossteil der Abwärme auf hohem Temperaturniveau von 90°C an ein Wärmennetz abgegeben wird, könnte vor allem die Strahlungswärme (ca. 3...5% der Nennleistung) direkt über einen Raum-Wärmetauscher in ein Anergiennetz mit einem Temperaturniveau von 30°C abgegeben werden.

### 3 Rahmenbedingungen zum Betrieb einer Gross-WKK-Anlage

Grundsätzlich sind Vorgaben des Bundes, der Kantone und der Gemeinden zu beachten. Diese können je nach Standort stark variieren. Im Folgenden wird deshalb eine Übersicht der zu erwartenden Bedingungen für eine Gross-WKK-Anlage aufgelistet.

#### 3.1 Lärmemissionen

Eine Anlage der vorgesehenen Grösse ist auf jeden Fall in der Planungsphase mit den massgebenden Behörden bezüglich der schaltechnischen Vorgaben zu prüfen. Aus zahlreichen WKK-Projekten, welche in den letzten Jahren realisiert wurden, ist jedoch davon auszugehen, dass als maximale Schallemission ein Grenzwert von 45 dB (A) in einer Entfernung von 10m gefordert werden. Als rechtliche Grundlagen sind zu nennen:

- Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (USG; SR 814.01)
- Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV; SR 814.41)

#### 3.2 Schwingungen

Die Drehzahlen der ECSES-Anlage sind mit rund 100 Umdrehungen pro Minute sehr langsam und die entstehenden Schwingungen, welche ggf. übertragen werden könnten, in einem sehr tieffrequenten Bereich.

Die Masse bzw. das Gewicht der ECSES-Anlage ist erheblich und erfordert auf jeden Fall entsprechend massive Fundamente, welche die Schwingungen bereits weitgehend von der Umgebung entkoppeln.

Bei entsprechender Auslegung ist nicht davon auszugehen, dass eventuelle Schwingungsemissionen über das Erdreich übertragen werden. Ein Beispiel dafür ist der Versuchsmotor von WinGD, welcher in unmittelbarer Nähe eines Wohngebiets betrieben wird. Als rechtliche Grundlage ist hier zu nennen:

- Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (USG; SR 814.01)

### 3.3 Emissionen

In der Schweiz werden die Grenzwerte für Emissionen durch die Luftreinhalteverordnung (LRV) [6] definiert. Diese besagt, dass die Stickstoffoxid-Emissionen eines Stationär-Motors mit einer Leistung von mehr als einem Megawatt im Betrieb mit gasförmigen Brennstoffen 100mg NOx pro Normkubikmeter nicht überschreiten dürfen. Für Motoren, die mit flüssigen Brennstoffen betrieben werden, dürfen 250 mg/Nm<sup>3</sup> nicht überschritten werden. Die Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 5 Prozent (% vol). Darüber hinaus haben mehrere Kantone für Regionen oder Städte sogenannte Massnahmengebiete festgelegt und strengere Grenzwerte erlassen. So gilt z.B. in der Stadt Zürich für Stickoxide ein Grenzwert von max. 50 mg/Nm<sup>3</sup>. In umliegenden Ländern gelten ähnliche Grenzwerte. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl relevanter Grenzwerte in Milligramm pro Normkubikmeter, bezogen auf 5% Sauerstoffgehalt.

Land	CH		Italien		Deutschland	
Aggregatzustand	gas	flüssig	gas	flüssig	gas	flüssig
O <sub>2</sub> -Konzentration [%]	5	5	5	5	5	5
CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	300	300	267	578	300	300
NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	100	250	200	178	800	500
SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	n.a.	n.a.	93	178	10	10
PM [mg/Nm <sup>3</sup> ]	10	10	13	27	20	20

Tabelle 1: Vergleich von gängigen Emissionsgrenzwerten für stationäre Verbrennungsmotoren

In Deutschland werden die Emissionen durch die «Technische Anleitung Luft» (TA Luft) festgelegt [7]. Global können die Richtlinien der Weltbank, die «World Bank emission guidelines for thermal power plants (WBEG)», als Auslegekriterium für WKK-Anlagen herangezogen werden. In der VDMA Ausgabe «Engines and systems, emission legislation diesel and gas engines» [8] können weitere Informationen zu Richtlinien entnommen werden. Lokale Gesetzgebungen, wie die hier beschriebenen Massnahmengebiete in der Schweiz, werden dort jedoch nicht erfasst.

Aufgrund der Grösse und Leistungsklasse der WinGD Zweitaktmotoren, sowie der Anwendung als elektrische Hauptversorger, werden sie des Öfteren mit Gasturbinen konkurrieren müssen. Hier sind die Abgasnormen noch einmal etwas schärfner, wie in Tabelle 2 ersichtlich ist. Diese Werte können selbst für den X-DF-Motor, zurzeit der weltweite Massstab in Sachen Effizienz und Emissionen maritimer Zweitaktmotoren, nur mittels zusätzlichen Massnahmen wie Abgasrückführung (iCER [9]) oder einer Entstickungsanlage (Selective Catalytic Reduction - SCR) erreicht werden.

Land	CH		Italien		Deutschland	
Aggregatzustand	gas	flüssig	gas	flüssig	gas	flüssig
O <sub>2</sub> -Konzentration [%]	15	15	15	15	15	15
CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	35	35	50	217	100	100
NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	20	40	50	67	75	150
SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	120	120	35	67	10	10
PM [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Russzahl 2	n.a.	5	10	n.a.	Russzahl 2

Tabelle 2: Vergleich von gängigen Emissionsgrenzwerten für Gasturbinen

### 3.4 Brennstoffe

Die LRV ist auf standardisierte Brennstoffe wie Heizöl, Benzin aber z.B. auch Biogas, ausgelegt, um nur einige zu nennen. Werden in der ECSES-Anlage nicht in der LRV aufgeführte Brennstoffe eingesetzt, wird die Definition der Grenzwerte der Abgasemissionen komplexer. Im Rahmen dieser Studie wurden mit dem AWEL Zürich diesbezüglich Abklärungen durchgeführt. Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass beim Einsatz von z.B. flüssigen Abfallstoffen wie Lösungsmitteln oder Altöl, Abklärungen mit den zuständigen Behörden erforderlich sind. Anzunehmen ist, dass in einem solchen Fall Emissionsgrenzwerte ähnlich wie in einer Kehrrichtverbrennungsanlage einzuhalten sind.

## 4 Der Zweitaktmotor als WKK-Anlage

Im traditionellen Vergleich zwischen GUD- und WKK-Anlagen wurden bisher hauptsächlich Viertaktmotoren für die Energieumwandlung betrachtet. Bei solch einem Vergleich fällt die WKK-Anlage wegen des geringeren mechanischen Wirkungsgrades an zweite Stelle. Abbildung 1 zeigt einen Vergleich von Wirkungsgraden verschiedener energieerzeugender Systeme bezüglich der produzierten mechanischen Leistung.

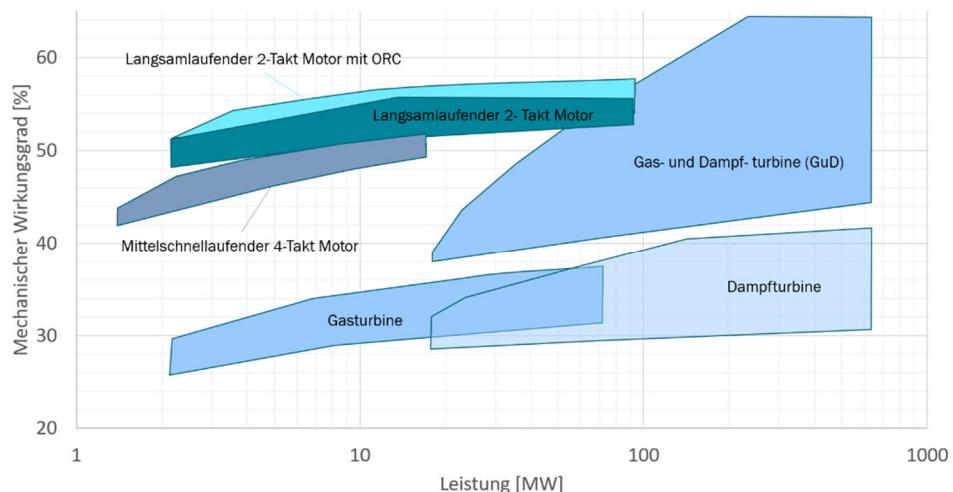


Abbildung 1: Vergleich von Wirkungsgraden verschiedener energieerzeugender Systeme [10]

Bei der Betrachtung der Wirkungsgrade über das dargestellte Leistungsspektrum fällt auf, dass im Lastbereich von 2 MW bis etwa 100 MW, neben der klassischen Turbinenanwendung der langsam laufende Zweitaktmotor

den höchsten Wirkungsgrad und somit ein erhebliches Anwendungspotential aufweist. Das Leistungsspektrum einer solchen Anwendung lässt sich auf mehrere Arten skalieren. Aufgrund ihrer Anwendung als Direktantrieb in Handelsschiffen (der Propeller sitzt hier ohne Getriebe oder Kupplung direkt in der Verlängerung der Kurbelwelle) bieten Zweitaktmotoren ein breites Spektrum an Tuning-Möglichkeiten, um Drehzahl, Leistung und Verbrauch genau auf die spezifische Anwendung abzustimmen. Darüber hinaus kann man anhand der Bohrungsgröße und der Zylinderzahl die Leistungsklasse beliebig skalieren. Abbildung 2 zeigt die hohe Flexibilität und die breite Verteilung des Leistungs-Spektrums solcher Motoren deutlich, wobei gesagt werden muss, dass sich hinsichtlich Drehzahl und Zylinderkonfiguration nicht alle Kombinationen für den Kraftwerksbau eignen. Es wird grundsätzlich zwischen zwei Kategorien unterschieden:

- Dual Fuel Motoren, bekannt unter dem Kürzel X-DF, diese können sowohl mit dem Otto- wie auch mit dem Dieselbrennverfahren betrieben werden.
- Reine Dieselmotoren, (sowohl Motoren der X-Generation wie auch ältere Generationen der RT-flex Serie) diese haben einen höheren Wirkungsgrad und das grössere Potential, die Abgaswärme zu nutzen.

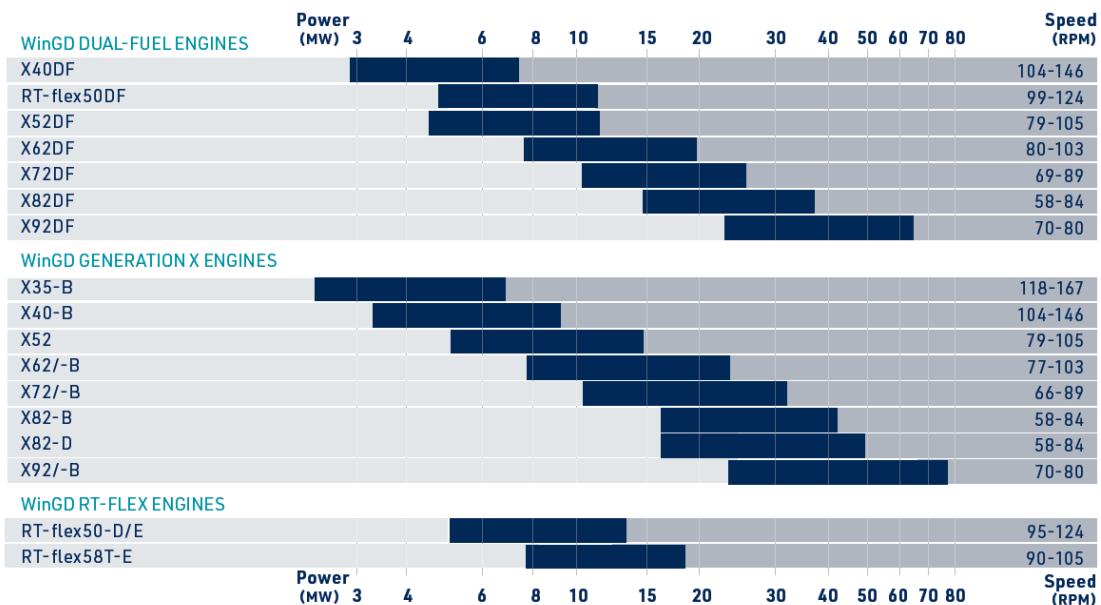


Abbildung 2: Leistungsspektrum langsam laufender Zweitaktmotoren von WinGD [12]

Diese Motoren haben ihren Ursprung im marinen Bereich, was ein hohes Mass an Betriebssicherheit, Einfachheit im Unterhalt und Effizienz mit sich bringt. Die Tatsache, dass bei der Auslegung eines solchen Motors grossen Wert auf Lebensdauer gelegt wird (teilweise bis zu 40 Jahre mit durchschnittlich 6'000 Betriebsstunden pro Jahr), erklärt die tiefen Betriebskosten verglichen mit anderen Konzepten.

Abbildung 2 zeigt einen Zweitakt-Dual-Fuel-Motor mittlerer Grösse. Durch den Schnitt durch den ersten Zylinder und Blick auf den Kolben ist das mechanische Prinzip dieser Motoren mit extrem langem Hub ersichtlich. Der Kolben sitzt auf der Kolbenstange, welche sich nur in vertikaler Motorrichtung bewegt. Über den Kreuzkopf werden die Kräfte auf die Schubstange schlussendlich an die Kurbelwelle übertragen.

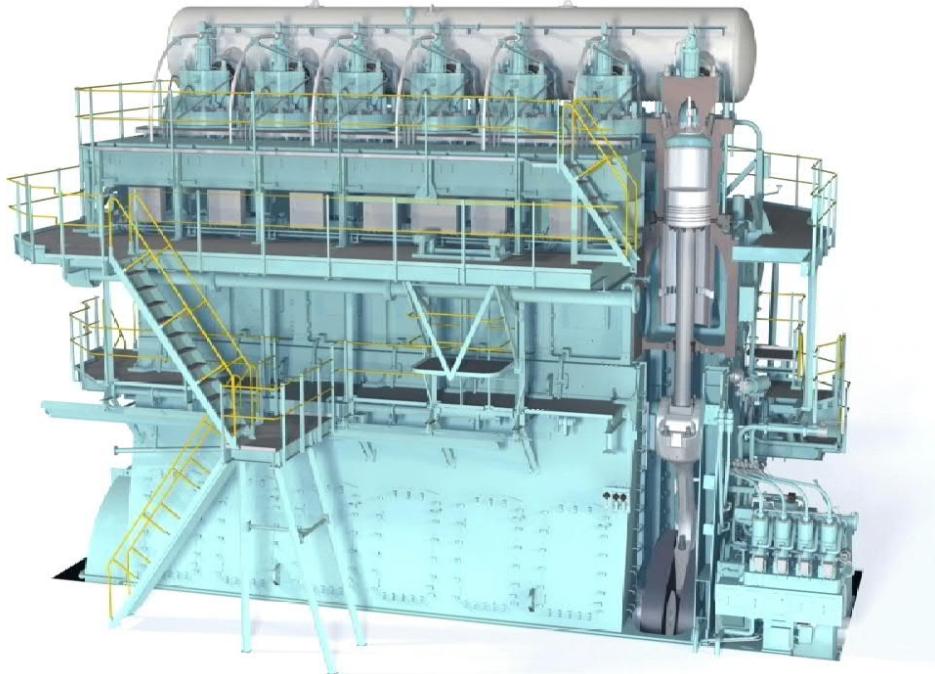
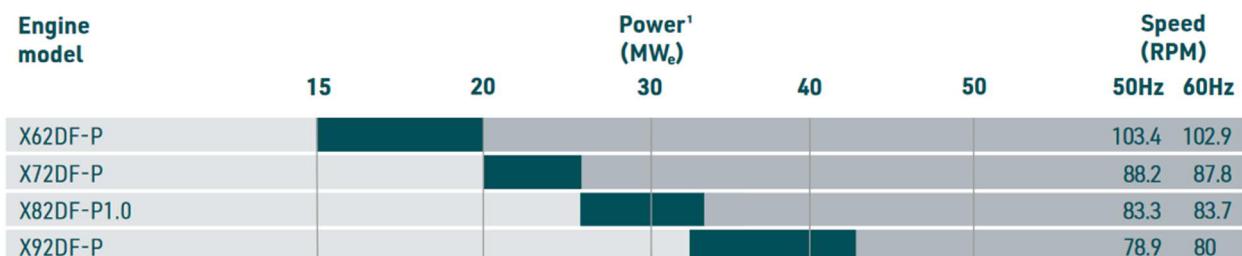


Abbildung 3: Klassischer langsam laufender Zweitakt-Dual-Fuel-Motor [12]

Die Verfügbarkeit über ein breites Leistungsspektrum von 2.5 MW bis 80 MW prädestinieren ihn daher als optimale Lösung zur Bereitstellung von günstigen Antriebs- und Energielösungen. Einer der interessantesten Vorteile eines solchen Motors ist jedoch die Tatsache, dass ein breites Spektrum an Brennstoffen und Brennstoffqualitäten genutzt werden kann. Diese Brennstoffe können flüssig, gasförmig und unter bestimmten Voraussetzungen, teilweise sogar fest sein. Auch bezüglich der Brennstoffqualität sind diese Motoren sehr genügsam. Sogenannte «Residual» oder «Heavy Fuel Oils», eigentlich Abfallprodukte der petrochemischen Industrie, können mit entsprechender Vor- und Aufbereitung als Brennstoff genutzt werden. Dies soll jedoch nicht zur Anwendung kommen, aber die Tatsache erlaubt den Ausblick auf mögliche erneuerbare Brennstoffe mit Qualitäten, welche die meisten anderen Anwendungen ausschliessen.

Seit dem Jahr 2020 bietet WinGD auch ein Portfolio speziell für den Kraftwerkssektor an. Abbildung 4 zeigt die Leistungsspektren dieser Motoren. Aufgrund der geänderten Randbedingungen (Generatorkennlinie statt Propellerkennlinie, Vibrationen, Fundament statt Schiffshülle etc.) müssen diese Motoren andere Kriterien erfüllen.

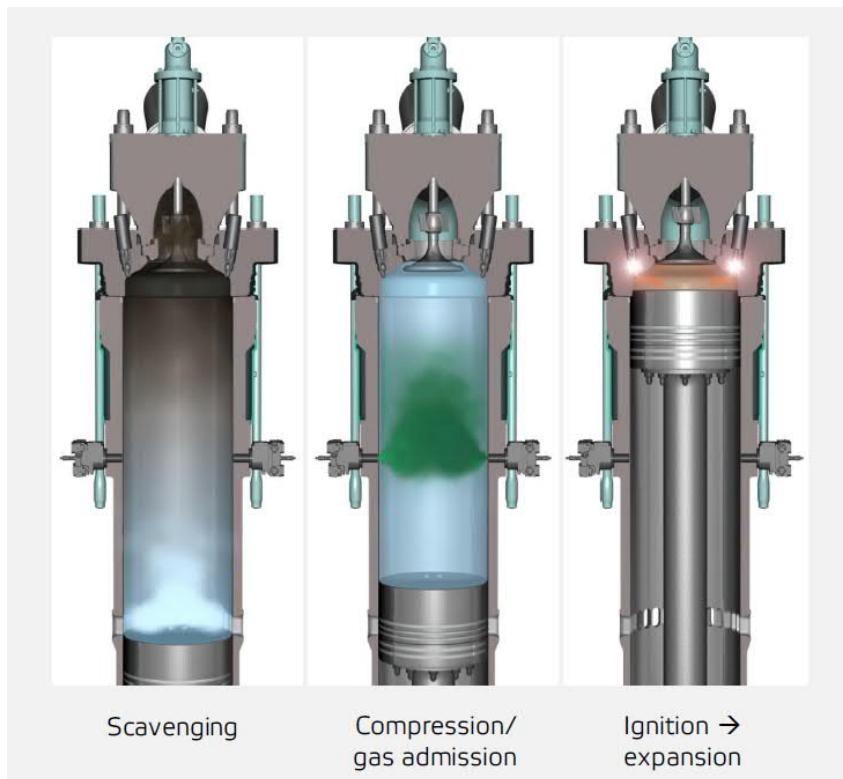


<sup>1</sup> Expected MW<sub>e</sub> at generator terminal assuming a generator efficiency of 97.5%

Abbildung 4: Leistungsspektrum langsam laufender Zweitaktmotoren von WinGD, speziell für stationäre Stromproduktion [WinGD Powerplants](#)

## 4.1 Das Niederdruck Gas Konzept

Um die geltenden (maritimen) Emissionsvorschriften einzuhalten – und sogar deutlich zu unterbieten – hat WinGD, neben technisch optimalen Lösungen für den Dieselbetrieb, die Reihe der X-DF Motoren entwickelt. Damit kann eine umweltverträgliche, kostengünstige, hocheffiziente und zuverlässige Lösung in Form von Niederdruck-Gasmotoren angeboten werden. WinGD X-DF Motoren könnte man als Hybridmotoren bezeichnen, da sie nicht nur mittels des Diesel-Prinzips betrieben werden können, sondern alternierend oder gleichzeitig auch nach dem Prinzip der geschichteten, mageren Vormischverbrennung (Otto-Prinzip) funktionieren. Abbildung 5 zeigt das Prinzip der geschichteten Ladung anhand der Gaseinblasung in der Mitte des Kolbenhubs.



*Abbildung 5: Prinzip der geschichteten, mageren Vormischverbrennung eines langsam laufenden Zweitaktmotors [12]*

Das X-DF-Niederdruckkonzept bietet gegenüber dem im Diesel-Prinzip betriebenen Hochdruckgasmotor oder der klassischen Diesel-Anwendung mehrere Vorteile:

- Niederdruckgasversorgung bedeutet niedrige Investitionskosten für das Gasversorgungssystem, geringen Stromverbrauch und niedrige Wartungskosten.
- Die Brennstoffmenge für den Zündstrahl (Diesel) liegt unter 1% der Gesamtwärmeabgabe bei Motor-Nennleistung.
- Niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen im Gasbetrieb (unter 100 mg/Nm<sup>3</sup> ohne Abgasnachbehandlungssystem).
- Die Feinstaubemissionen sind gegenüber dem Dieselbetrieb deutlich reduziert (unter 10 mg/Nm<sup>3</sup>).

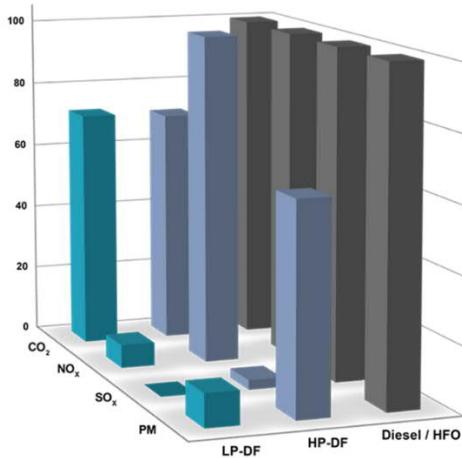


Abbildung 6: Relative Emissionswerte für Zweitaktmotoren im Dieselbetrieb, Hochdruck-Gasbetrieb sowie Niederdruck-Gasbetrieb. [12]

## 4.2 Der Betrieb des Zweitakt Dual Fuel Motors

X-DF Motoren bieten dem Betreiber nach wie vor die Möglichkeit flüssige Brennstoffe zu verbrennen. Die X-DF Technologie sieht den Wechsel zwischen beiden Brennstoffarten während des Betriebs und bei jeder Last vor. Dieser Wechsel findet notfalls augenblicklich und ohne Verlust der Motorleistung statt. Ein wesentlicher Punkt hierbei ist die Möglichkeit den Motor auch permanent gleichzeitig im Diesel- und Otto-Prinzip betreiben zu können. Was eine äusserst interessante Alternative darstellt, da in diesem Betriebsmodus ein breites Spektrum an fossilen und biogenen Brennstoffen flüssig und gasförmig gleichzeitig benutzt werden kann. Abbildung 7 stellt mögliche Mischbetriebe über das Leistungsspektrum dar.

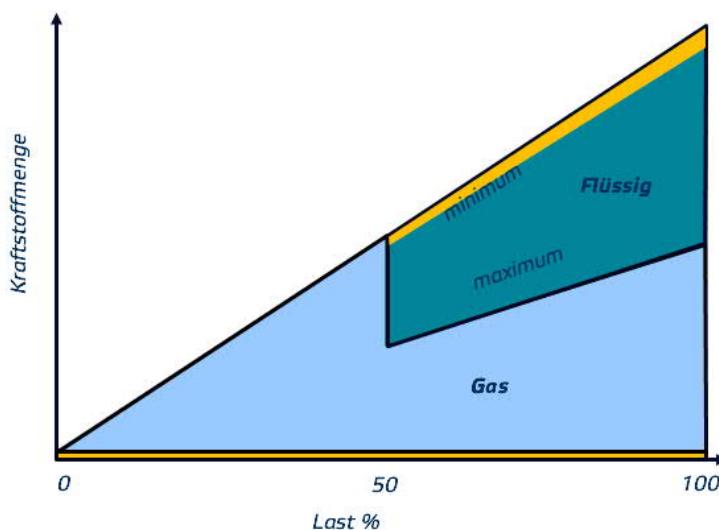


Abbildung 7: Mischbetrieb von gasförmigen und flüssigen Brennstoffen über das Leistungsspektrum eines Dual Fuel Motors [12]

Grosse Zweitaktmotoren können so optimiert werden, dass sich der Wirkungsgrad über die abgegebene Leistung im Bereich zwischen 40% und 100% nur leicht verändert. Dies ist eine Eigenschaft die eindeutig zu den Vorteilen einer möglichen Anwendung als Stromerzeuger genannt werden muss, da sie dem Betreiber

die Möglichkeit bietet, verschiedene Strommärkte gleichzeitig zu bedienen. Zum Beispiel ist denkbar, dass der Motor konstant 50% Grundlast fährt und falls nötig sehr rasch auf Bedarfsänderungen reagieren kann.

## 5 Brennstoffe

Der bestechende Vorteil der hier beschriebenen Zweitakt WKK Anwendung, ist ganz klar die Möglichkeit, mit solch einem System eine Vielzahl verschiedenster Brennstoffe und Brennstoffqualitäten zu nutzen. Dabei sind neben Aggregatzuständen (gasförmig, flüssig) auch Herkunft und Verfügbarkeit dieser Brennstoffe zu berücksichtigen. Im Folgenden sollen deshalb verschiedene Brennstoffe aufgezeigt werden und eine kurze Abschätzung deren Potentials gemacht werden.

### 5.1 Brennstoffklassen

#### Fossile Brennstoffe:

Für eine Vielzahl von Anwendungen werden aufgrund der hohen Verfügbarkeit und der bereitstehenden Infrastruktur nach wie vor flüssige und gasförmige Brennstoffe auf fossiler Basis verwendet. Ein Vorteil solcher Brennstoffe ist die hohe Energiedichte. Globale Bestrebungen hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasemissionen lassen jedoch einen deutlichen Trend erkennen, die fossilen Brennstoffe mittel- bis längerfristig durch CO<sub>2</sub> reduzierte Brennstoffe zu ersetzen [14]. Allerdings sind Alternativen derzeit noch nicht in ausreichendem Mass konkurrenzfähig. Daher müssen vorhandene Technologien möglichst effizient eingesetzt und mit Weitsicht weiterentwickelt werden.

#### Biogene Brennstoffe:

Biogene Brennstoffe bestehen aus biologischem oder organischem Material und werden in unveränderter (z.B. Holz), in vorbehandelter Form (z.B. mittels Torrefikations- oder Pyrolyseverfahren) oder veränderter Form (z.B. Biomethan, Bioethanol, etc.) in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand genutzt. In vielen Anwendungen ist die Beimischung zu konventionellen Brennstoffen wie Erdgas, Diesel oder Benzin marktgängig. Ein Blick auf derzeitige Forschungsprojekte zeigt deutlich, dass biogenen Brennstoffen ein erhebliches Potential prognostiziert wird [15], [19].

#### Synthetische Brennstoffe:

Synthetisch hergestellte Brennstoffe umfassen eine breite Palette von Grundstoffen, Umwandlungsverfahren und Eigenschaften. Die Zusammensetzung und die Eigenschaften synthetischer Brennstoffe sind vielfältig, sie können konventionellen Brennstoffen entweder beigemischt werden oder diese vollständig ersetzen. Daraus können besondere Herausforderungen an die Verbrennung entstehen. Wichtig bei der Herstellung dieser Brennstoffe ist, dass die Auswirkungen der Brennstoffeigenschaften auf eine hocheffiziente und schadstoffarme Verbrennung berücksichtigt werden. Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung einiger Brennstoffe die denkbar wären für eine Anwendung in grossen Zweitaktmotoren.

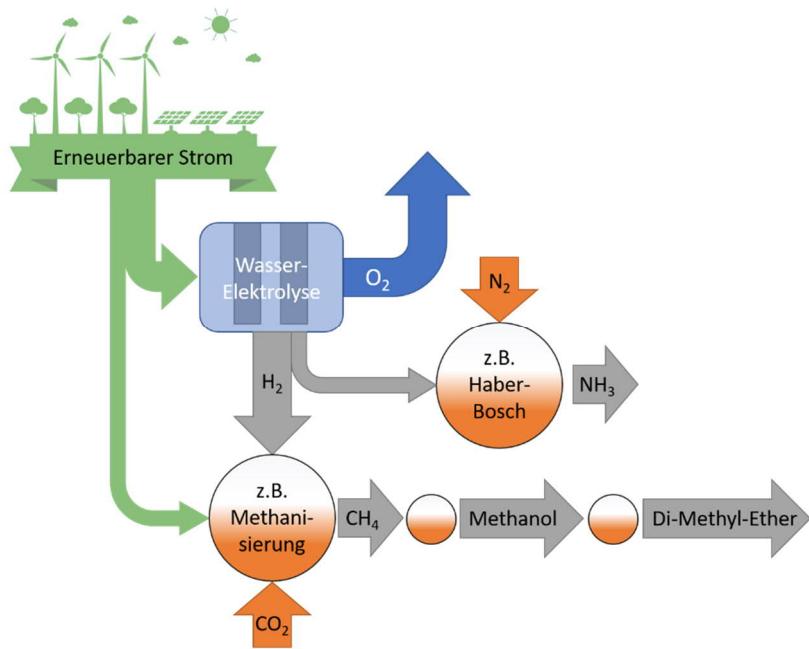


Abbildung 8: Schematisierte Darstellung einiger ausgewählter synthetischer Brennstoffe

Um eine Aussage zur Anwendbarkeit von möglichen Brennstoffströmen in der Schweiz machen zu können, müssen deren Verfügbarkeiten zunächst quantifiziert werden. Ob ein potenziell verfügbarer Brennstoff für eine Anwendung in diesem Projekt jedoch in Frage kommt, hängt nicht zuletzt von dessen prozessrelevanten Eigenschaften ab und bedarf einer spezifischen Abklärung an entsprechenden Versuchsträgern. Im Folgenden werden potenzielle Brennstoffe kurz beschrieben, welche für eine Anwendung in der hier untersuchten Anlage in Frage kommen.

## 5.2 Potenzielle Brennstoffe

Tabelle 9 auf Seite 50 des Anhangs gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit der Brennstoffe, sowie der Bereitschaft eines grossen Zweitaktmotors zu deren Nutzung.

### Gebrauchte Schmiermittel

Unter diesem Begriff sind vor allem gebrauchte Motorenöle aus dem Mobilitätsbereich, diverse Schmiermittel und Hydrauliköle zu verstehen. Diese Öle werden gemäss Recherchen von spezialisierten Entsorgungsfirmen gesammelt und primär als Brennstoff für die Zementindustrie weiterverkauft. Laut der Sonderabfallstatistik des BAFU wurden in der Schweiz 2017 40'629 Tonnen Motorenöle verbrannt [21]. Über Qualität und die verbrennungstechnischen Eigenschaften solcher Abfallprodukte ist bisher wenig bekannt. Eine Verwendung im grossen Zweitaktmotor wäre theoretisch denkbar, es könnten allerdings Modifikationen am Motor, genauer im Bereich der Zylinderschmierung nötig werden.

### Lignin basierte Brennstoffe

Im Rahmen des Förderprogramms Horizon 2020 der Europäischen Union verfolgt unter anderem das FALCON Projekt das Ziel, Lignin mittels Enzymen von Pilzen in eine Art Bio-Schweröl umzuwandeln [15]. Dieses

dickflüssige Öl könnte dann entweder direkt als (mariner) Brennstoff verwendet werden oder als Ausgangsbasis für chemische Produkte als Alternative zur petrochemischen Industrie. WinGD ist als Projektpartner für die Definition der Eigenschaften des Bio-Schweröls sowie das anschliessende Testen der Brennstoffeigenschaften verantwortlich. Das FALCON-Projekt verfolgt hierbei einen wichtigen Ansatz zur Vereinfachung der Brennstoffherstellung. Aufgrund der Tatsache, dass marine Zweitaktmotoren genügsamer sind in Bezug auf die Reinheit und Qualität der Brennstoffe, könnten gegenüber den hochwertigen Brennstoffen für die Anwendung auf der Strasse oder gar in der Luft, gewisse energie-intensive Prozessschritte weggelassen werden. Dies erhöht die Gesamteffizienz der Brennstoffkette "Well to Propeller" oder im hier gezeigten Beispiel "Well to Power". Im IDEALFUEL Projekt wird die gleiche Strategie verfolgt, jedoch startet dieses bei einem höheren Technischen Readiness Level [16].

### Pflanzenöle

Pflanzliche Öle werden schon länger als Brennstoff für Dieselmotoren verwendet und eignen sich daher auch für eine Anwendung in grossen Zweitaktmotoren. Es werden häufig Biokraftstoffe der ersten und zweiten, teils sogar schon dritten Generation unterschieden.

Als Biokraftstoffe der ersten Generation versteht man zumeist jene Kraftstoffe, die aus den Inhaltsstoffen (wie zum Beispiel Öl, Stärke, Zucker) von nur wenigen Teilen der Pflanzen produziert werden, wobei ein Großteil der Pflanze anders wertig, zum Beispiel als Futtermittel verwendet wird. Dazu zählen die derzeit am Markt befindlichen und großtechnisch produzierten Kraftstoffe Biodiesel, der aus Pflanzenöl oder Altspeiseöl produziert wird oder Bioethanol, welches aus der Vergärung von Getreide oder Zuckerrohr gewonnen wird.

Als Biokraftstoffe der zweiten Generation werden all jene Kraftstoffe bezeichnet, für die als Rohstoff die vollständigen Pflanzen verwendet werden. Dazu zählen Bioethanol aus Zellulose wie zum Beispiel aus Stroh oder BTL-Biodiesel zum Beispiel aus Holz. Alle Verfahren sind technisch deutlich aufwendiger als jene zur Herstellung der Biokraftstoffe der ersten Generation und befinden sich derzeit in der Phase der Demonstration und einzelner Pilotanlagen. Als Biokraftstoffe der dritten Generation werden Biokraftstoffe aus Algen bezeichnet, wobei es sich dabei um ein reines Forschungsthema handelt und derzeit noch nicht absehbar ist, ob und wann diese Kraftstoffe eine Marktreife erlangen werden.[17]

Biokraftstoffe der ersten Generation werden hier nicht betrachtet, da diese Öle ausschliesslich für Lebensmittel verwendet werden und eine Verwendung als Brennstoff daher ethisch und ökologisch nicht zu vertreten ist. Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation erfordern einen meist deutlich höheren technischen und finanziellen Aufwand und können daher bisher noch nicht wirtschaftlich effizient erzeugt werden. Aufgrund der höheren Viskosität gegenüber Diesel und der geringeren Cetanzahl sind für Viertaktmotoren in der Regel jedoch Anpassungen nötig [20]. Bei langsamlaufenden Zweitaktmotoren sollten die Brennstoffe aber ohne grosse Vorbehandlung verwendet werden können was das Brennstoffspektrum deutlich erhöht den Gesamtwirkungsgrad «Well-to-Grid» weiter erhöht: Dies erlaubt zum Beispiel die Produktionskette gegenüber Rapsmethylester (RME) zu verkürzen, da die für RME nötige Um-Estherung entfällt. In diesen Bereich fällt unter anderem auch Palmöl, welches in den vergangenen 10 Jahren in kleinen WKK-Anlagen als Brennstoff eingesetzt wurde. Diese Anlagen sind inzwischen jedoch alle ausser Betrieb. Palmöl als Brennstoff ist aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll, wenn dafür Regenwälder abgeholt werden [18].

### Tierische Fette

Tierische Fette werden in der Schweiz von zwei Unternehmen produziert und für technische Anwendungen vertrieben. Gemäss Auskunft der Tiermehl Fabrik in Bazenheid (TMF) wird aktuell der grösste Teil der produzierten Tierfette nach Deutschland exportiert, wo spezialisierte Betriebe die Fette zu Biodiesel aufarbeiten. An dieser Stelle bietet sich die Möglichkeit die Produktionskette zu verkürzen, indem diese Fette mit wesentlich kleinerem Aufwand direkt dem Zweitakt WKK zugeführt werden. Solche Versuche wurden an einem grossen Zweitakt-Versuchsmotor bereits erfolgreich durchgeführt (Kundenuntersuchung, interner Bericht WinGD).

In der Schweiz fallen pro Jahr etwa 18'000 Tonnen tierischer Fette (TMF) an (Energieäquivalent ca. 18 Mio. Liter Heizöl). Die hier untersuchte ECSES WKK-Anlage mit 30 MW Leistung würde bei einem Betrieb mit 100 % tierischer Fette und einer Jahreslaufleistung von 7'000 Stunden etwa 40'000 Tonnen dieses Brennstoffes benötigen. Nutzt man die Tierfette in Kombination mit konventionellen Brennstoffen, liesse sich ein kontinuierlicher Betrieb über das Jahr bewerkstelligen.

### Lösungsmittel

Recherchen im Bereich der chemischen sowie in der Zementindustrie in der Schweiz haben ergeben, dass Lösungsmittel, welche nicht mehr aufbereitet werden können, als Brennstoff zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang spricht man von Zementqualität, da dieser Brennstoff hauptsächlich in der Zementindustrie eingesetzt wird. Könnte ein solcher Brennstoff auch in einem Zweitaktmotor genutzt werden, liesse sich im Vergleich zum Zementofen eine massiv bessere Nutzung hinsichtlich Effizienz sowie der resultierenden Emission darstellen.

Gemäss der Sonderabfallstatistik des BAFU [21] wurden in der Schweiz 2017 über 216'000 Tonnen Lösungsmittel in Verbrennungsöfen entsorgt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Lösungsmittel im Umlauf eine relativ grosse Varianz des Wassergehaltes und damit des Heizwertes aufweisen (von ca.22 MJ/kg bis 40 MJ/kg). Diese liegen jedoch im Bereich, welche mit dem vorgesehenen Zweitaktmotor genutzt werden könnten. Um den ECSES-Motor mit Lösungsmitteln zu betreiben, ist motorseitig jedoch noch ein gewisser Entwicklungsaufwand nötig. Im HERCULES-2 Projekt [22] hat WinGD ein System entwickelt, dass solche Untersuchungen ermöglicht und auf dessen Basis man ein Produkt für den Motor entwickeln könnte. Diese Brennstoffe sind vor allem aus ökonomischer Sicht sehr spannend, da Lösungsmittel in Zementqualität teilweise mit negativen Preisen gehandelt werden. So variieren, je nach Wassergehalt bzw. Heizwert die Preise zwischen ±50 € pro Tonne.

### VOC (Volatile Organic Compounds)

Leichtflüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen werden im maritimen Bereich bereits als Brennstoff eingesetzt bzw. erste Anwendungen werden implementiert. Bei Erdöltankern ergeben sich beispielsweise Blow-off Gase in relativ grossen Mengen, welche direkt auf dem Schiff als Brennstoff verwertet werden können. Zurzeit konnten anhand diverser Befragungen von Unternehmen und Behörden noch keine grossen

VOC Quellen ausfindig gemacht werden, welche sich für die Nutzung eignen würden. Bei industriellen Betrieben vor allem in der Chemie sind VOC als Emissionen z.T. ein Thema, es wurden jedoch inzwischen Rückgewinnungsanlagen und Filtereinrichtungen installiert, so dass zumindest in der Schweiz von VOC als Brennstoff abgesehen werden muss.

### **Biogas**

Biogas, welches bei verschiedenen Gärprozessen in Form von Methan anfällt (z.B. Klärgas), wäre ein idealer Brennstoff für eine ECSES-Anlage. Aktuell steht es jedoch nicht in diesem Kontext zur Verfügung, da alle lokal produzierten Mengen zusammen nicht für einen kontinuierlichen Betrieb einer ECSES-Anlage ausreichen. Eine Beimischung dieser Gase wäre jedoch problemlos möglich.

### **Wasserstoff**

Wasserstoff wird im Rahmen verschiedenster Projekte als alternativer Brennstoff und als alternatives Speichermedium untersucht. Das Potential von Wasserstoff ist sehr hoch und der vollständige oder zumindest teilweise Betrieb eines marinen Zweitaktmotors mit Wasserstoff wäre denkbar. Da die entsprechende Infrastruktur für Herstellung, Transport und Lagerung von Wasserstoff derzeit noch nicht in ausreichendem Mass besteht, ist dieser Ansatz jedoch noch spekulativ. Zudem sind für eine geeignete Anwendung in der Zukunft noch wesentliche Untersuchungen und Entwicklungsschritte nötig.

### **Methanol / Ethanol**

Methanol und Ethanol können sowohl synthetisch (z.B. Methanol aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>) wie auch biogen hergestellt werden und sind daher auch sehr geeignete Energiespeicher für mobile Anwendungen. Sie sind allerdings sehr reine und daher wertvolle Brennstoffe und würden daher zuerst in der Luftfahrt oder im Strassenverkehr zur Anwendung kommen [15]. Nichtsdestotrotz wurde im HERCULES-2-Projekt gezeigt, dass ein effizienter Betrieb des Motors mit solch einem Brennstoff möglich ist und es gibt Bestrebungen diese Brennstoffe auch in der Schifffahrt zu nutzen um die nötige Dekarbonisierung zu erreichen.

### **Ammoniak**

Stickstoff basierte Brennstoffe werden derzeit als Energiespeicher für die Schifffahrt vorgeschlagen und sind Gegenstand vieler Forschungsvorhaben. Der einfachste auf Stickstoff basierende Brennstoff ist Ammoniak. Dieses ist die weltweit zweithäufigste hergestellte, anorganische Chemikalie und daher in grossem Ausmass verfügbar. Darüber hinaus wurde auch schon die Umwandlung von Ammoniak in eine Reihe weiterer Brennstoffe vorgeschlagen [23]:

- Ammoniaknitrat (AN)
- AN-basierten Mischungen wie wässriges Hydroxyl-Ammoniumnitrat, Ammonium-Dinitramid
- wässriges AN gemischt mit Ammonium-Hydroxid oder Harnstoff.

Auch hierbei sind jedoch noch Entwicklungsschritte notwendig.

### Kunststoffe (ReOil)

In der Vergangenheit wurden verschiedene Initiativen und Projekte gestartet, um Kunststoffabfälle in ein Erdöl-Substitut zurückzuführen. Oftmals waren Brennstoffe oder mögliche Rohstoffe für die Petrochemie das Ziel solcher Untersuchungen. Ein kürzlich veröffentlichter Bericht des österreichischen Energiekonzerns OMV präsentiert ein Projekt das sehr reif scheint, ReOil®. [24] Auch hier fällt als Zwischenprodukt ein sogenanntes «Synthetisches Rohöl» an, das über weitere Schritte wieder zu Kunststoffen oder Kraftstoffen verarbeitet werden kann. Solche Erdöl-Substitute könnten für die ECSES-Anlage wiederum interessant sein, da einerseits auch hierbei Prozessschritte abgekürzt werden könnten und eine höhere Gesamteffizienz erzielt werden könnte. In der Schweiz werden jährlich etwa 1'000'000 Tonnen Kunststoffe verbraucht (Referenzjahr 2010). Rund 250'000 Tonnen davon gehen als dauerhafte Produkte ins Zwischenlager. Über 750'000 Tonnen werden als Abfall entsorgt, wovon das meiste (ca. 80%) verbrannt wird [21].

## 6 Simulation zur thermodynamischen Analyse einer Zweitakt WKK-Anlage

Die oben aufgeführten Eigenschaften eines langsam laufenden Zweitaktmotors liefern klare Argumente eine solche Anlage als Stromerzeuger einzusetzen. Es stellt sich nun die Frage wie ein Vergleich eines solchen Motorenkonzepts mit gängigen Wärmelieferanten, also klassischen WKK-Systemen ausfällt. Um den Simulationsaufwand zu reduzieren, wird hier nur der DF-Motor betrachtet. Auch wenn der Dieselmotor rein thermodynamisch einen viel besseren Leistungsausweis vorweisen kann, ist es aufgrund der weitaus grösseren Brennstoffflexibilität sowie des geringeren Aufwands bei der Reduktion der Emissionen vorteilhafter wie auch einfacher einen DF-Motor zu installieren. Beim hier betrachteten Zweitaktmotor handelt es sich um einen 12X62DF-P1.0. Das heisst ein 12 Zylindermotor der X-Generation, Dual Fuel-Variante für Kraftwerksanwendungen (P für Powerplant), Version 1.0.

Mit Hilfe eines Motorenmodells eines 12X62DF-P1.0 soll anhand von Simulationen erörtert werden, wie der Gesamtwirkungsgrad eines solchen Konzepts aussehen könnte. Da ein solcher Motor erst theoretisch zum Portfolio gehört, muss auch ein entsprechendes Modell zuerst noch entwickelt werden. In einem ersten Schritt wird ein Einzylindermodell erstellt und anhand von In-Zylinder-Messdaten kalibriert: Druckverlauf, Temperaturen, etc. Dieses Einzylindermodell wird danach auf ein Mehrzylindermodell ausgeweitet, welches dann mit entsprechenden Messdaten vom Prüfstand (Leistungs-, Verbrauchs- und Emissionsmessung eines Produktionsmotors) validiert werden kann (Kapitel 6.1.1 & 6.1.2). Das validierte Model wird schliesslich auf die zu untersuchende Anlage 12X62DF-P1.0 erweitert, um die dafür optimalen Betriebsparameter hinsichtlich Brennstoffverbrauch und NOx Emissionen zu definieren (Kapitel 6.2.1 & 6.2.2). Da es sich bei diesem Projekt um eine Studie zur Anwendung als WKK-Anlage handelt werden Annahmen hinsichtlich Motorleistung, Verdichtungsverhältnis sowie maximalem Zylinderdruck getroffen, welche leicht von der klassischen Anwendung eines solchen Konzepts im Marinebereich abweichen können.

Basierend auf den Ergebnissen wird in einem letzten Schritt ein sogenanntes Waste Heat Recovery System ausgelegt. Dieses ist dazu da, die nach dem Turbolader im Abgasstrom verbliebene Enthalpie in mechanische Leistung umzuwandeln.

## 6.1 Entwicklung des Motormodells

Das Einzelzylindermodell besteht unter anderem aus der Strömung zwischen der Kolbenunterseite und der Auslassöffnung eines Zylinders. Der gesamte Entwicklungsprozess besteht aus drei Phasen:

- Dreipunktdruckanalyse
- Analyse des geschlossenen Volumendrucks
- Schlussüberprüfung

Für diesen Prozess wurden innermotorische Messdaten aus einem Motorentest verwendet. Zu den gemessenen Daten gehören unter anderem verschiedene Temperaturen, der Druckverlauf der Kolbenunterseite, im Zylinder und im Auslass-Receiver sowie Ventilsteuер- und Einspritzzeiten. Für die Simulationsmodelle mit mehreren Zylindern wird die entsprechende Anzahl Instanzen des Einzylindermodell miteinander via Einlasspfad der Luft und Auslasspfad des Abgases gekoppelt. Der Abgleich mit Messdaten aus dem Motorentest (Brennstoffverbrauch, Leistung, Emissionen, Turboladerwirkungsgrad etc.) erlaubt dann eine Aussage betreffend der Robustheit und der Vorhersagegenauigkeit des Modells.

### 6.1.1 Abgleich im Dieselbetrieb mit Marine Diesel Oil (MDO)

Das Mehrzylindermodell für den Dieselbetrieb ist in Abbildung 9 dargestellt. Gut zu erkennen die einzelnen Zylindermodelle in der Mitte der Abbildung und deren Kopplung ober- und unterhalb mittels Frischluft- und Abgas-Pfads. Unten rechts sieht man das virtuelle Motorsteuergerät (Engine Control Unit, ECU), in welches der effektive Code für ein reales Motorsteuergerät geladen werden kann. Der Vorteil eines derartigen Setups ist das direkte Einbinden der Kontrollsoftware, die auch den echten Motor im Feld steuert. Dies erlaubt eine sehr realitätsnahe Betrachtung des Systems.

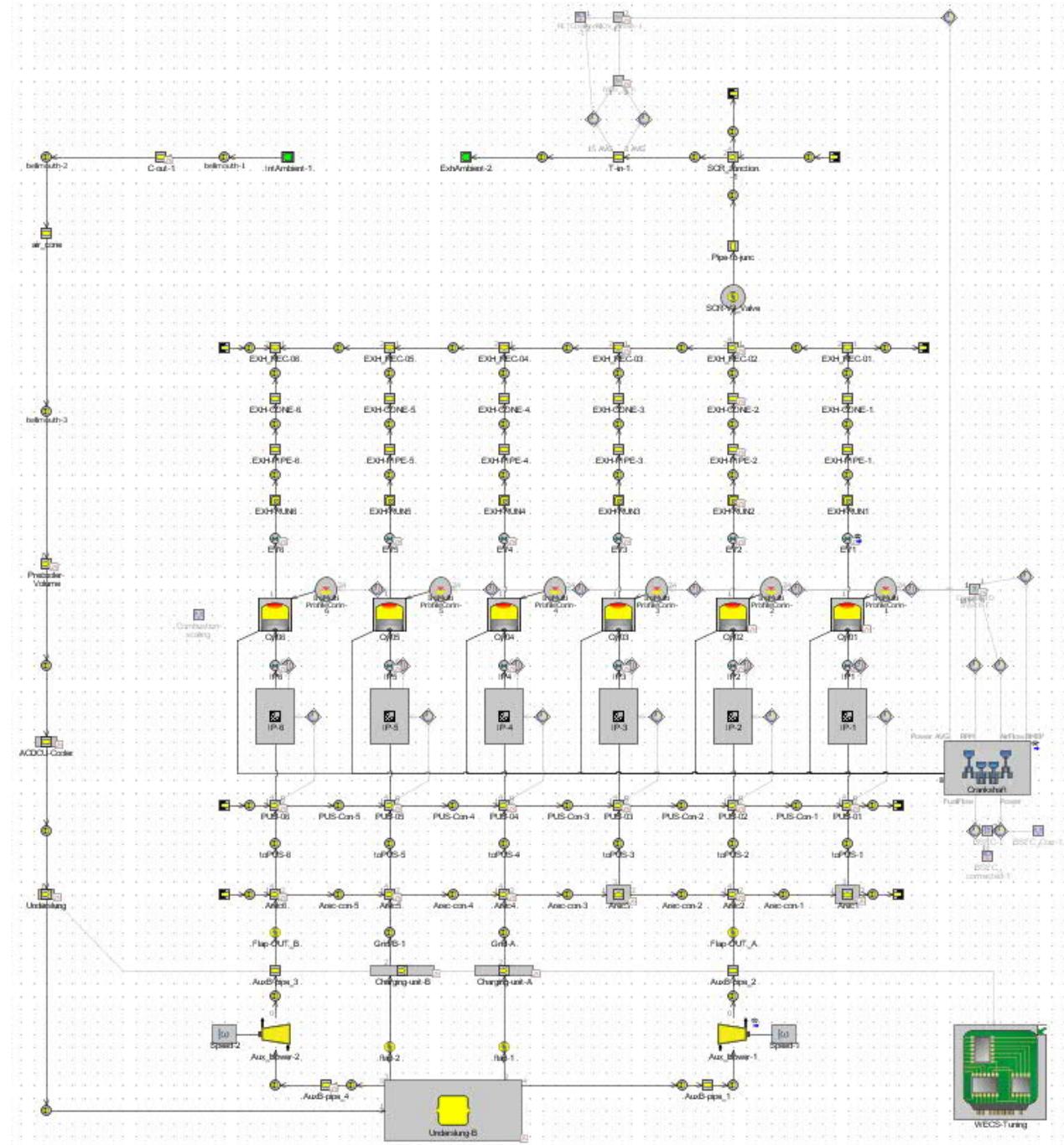


Abbildung 9: Modell eines 6X62DF Dieselmotors

Abbildung 10 zeigt die Abweichung der Simulation gegenüber den Messwerten der für diese Untersuchung relevanten Vergleichswerte. Aufgetragen als Funktion der Motorlast ist die relative Abweichung in Prozent zwischen den Ergebnissen der Simulation und den Messdaten vom Motorenprüfstand.

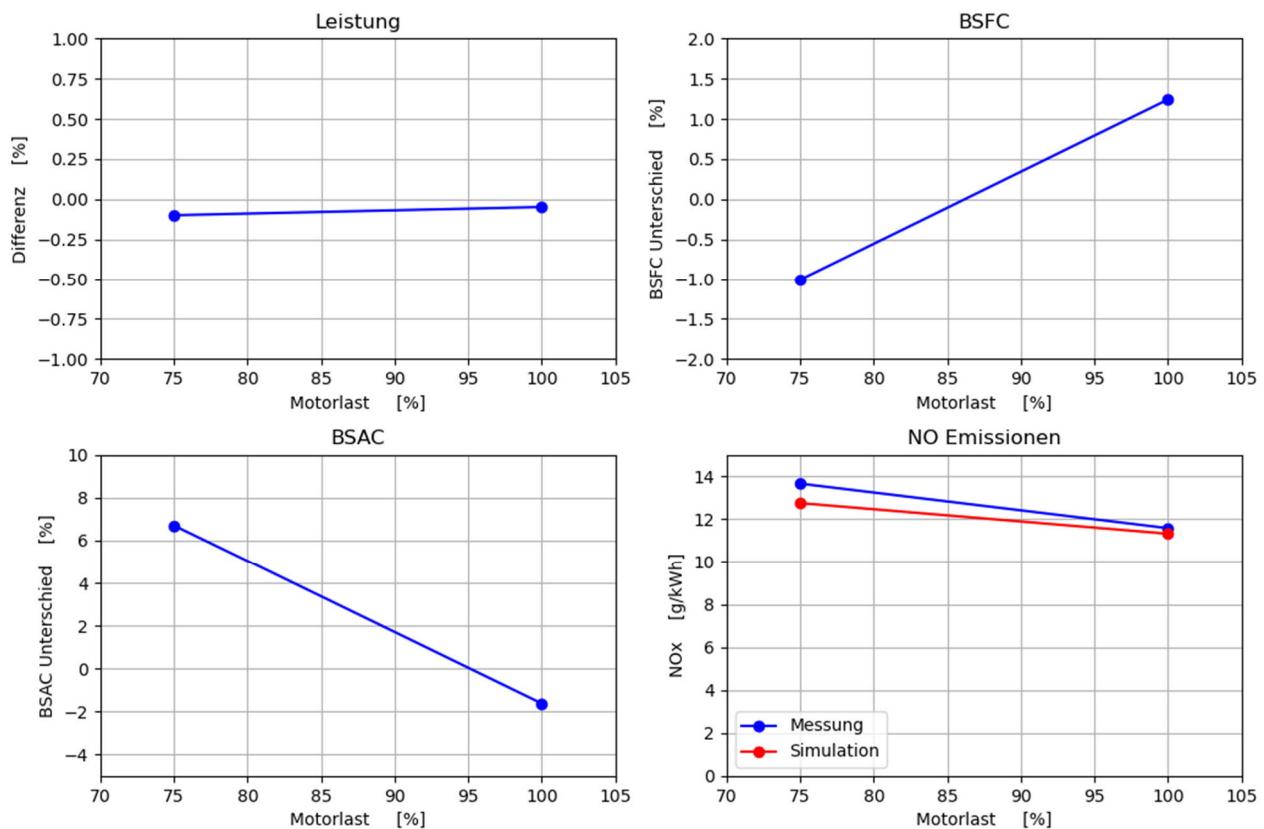


Abbildung 10: Relative Abweichung in Prozent zwischen ausgesuchten Simulations- und Messergebnissen eines 6X62DF Motors im Dieselbetrieb

Die Simulation von sowohl Brennstoffverbrauch (BSFC) als auch Luftmassenstrom (BSAC) liefert ansprechende Resultate. Die Simulation der NO<sub>x</sub> – Emissionen, sowohl im Diesel- als auch im Gasbetrieb ist derzeit mit vernünftigem Rechenaufwand noch nicht möglich. Die gezeigten Resultate basieren auf vereinfachten Berechnungen und Gradienten, trotzdem ist die Qualität der Simulationsresultate genügend. Diesen Ergebnissen für den Dieselbetrieb zufolge lassen sich nun Vorhersagen mit akzeptabler Genauigkeit für Betriebsbereiche ausserhalb der Messdaten machen.

### 6.1.2 Abgleich im Gasbetrieb mit Liquified Natural Gas (LNG)

Analog zum Vorgehen für den Dieselbetrieb wird auch für den Gasbetrieb ein Modell erstellt. Hierbei wird das Zylindermodell zusätzlich noch um eine Vorkammer erweitert, um den Zündstrahl zu simulieren. Darüber hinaus ist eine Erkennung von Früh- oder Vorzündungen eingebaut. Auch hier werden die Simulationsergebnisse mit den Messdaten vom Gasbetrieb verglichen, diese sind in Abbildung 11 dargestellt.

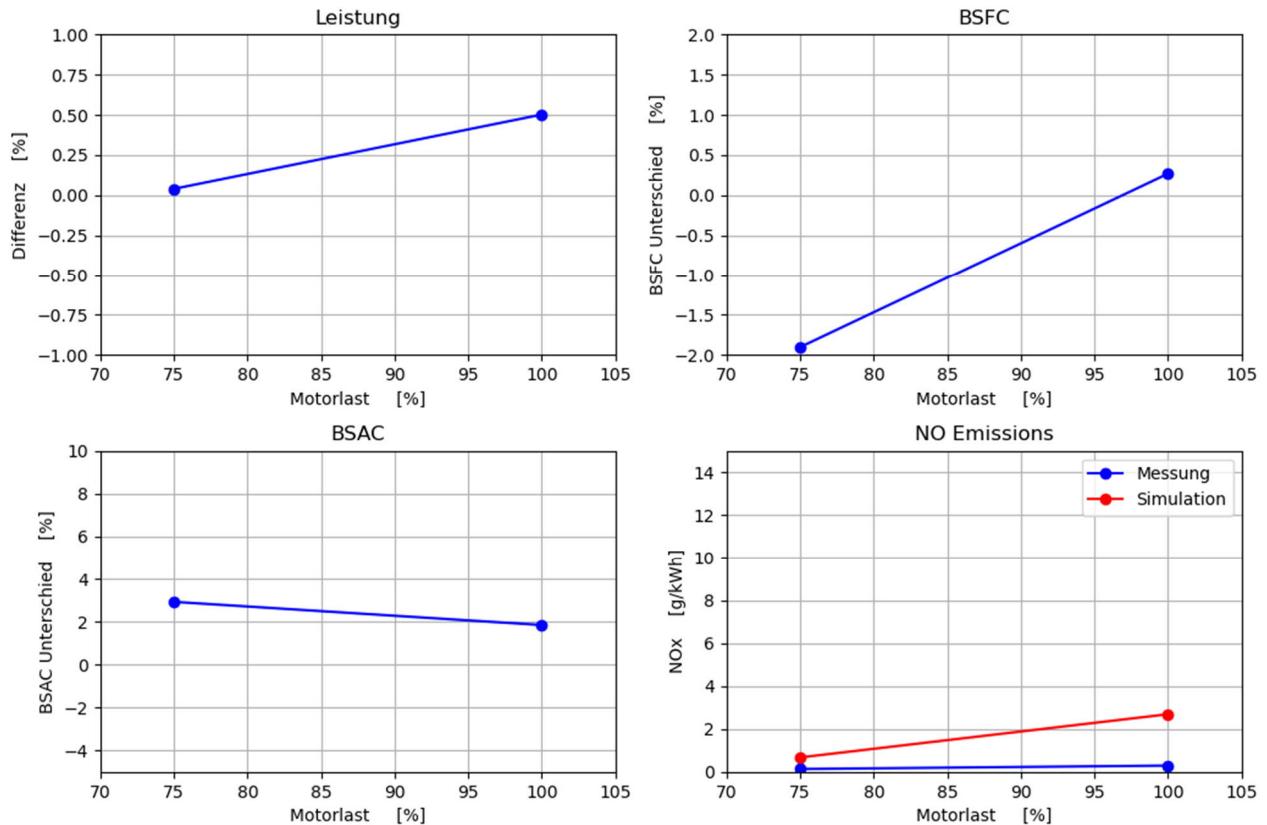


Abbildung 11: Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen eines 6X62DF Motors im Gasbetrieb

Wie auch im Dieselbetrieb zeigen Mess- und Simulationsergebnisse im Gasbetrieb generell eine akzeptable Übereinstimmung mit den zu erwartenden Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen. Einzig die Berechnung der NO<sub>x</sub> Emissionen liegt deutlich über den gemessenen Werten. Zusätzlich zu den beim Dieselbetrieb erwähnten Schwierigkeiten muss beim Gasmotor noch eine Vorkammer simuliert werden. Das Vorkammermodell (Kopplung von Diffusions- und Vormischverbrennung) arbeitet noch nicht mit der gewünschten Genauigkeit. Deswegen werden für eine möglichst genaue Vorhersage der NO<sub>x</sub> Emissionen vorhandene Messdaten ähnlicher Betriebspunkte verwendet.

Auch wenn die Qualität der hier durchgeführten Vorhersagen in gewissen Bereichen noch nicht gänzlich zufriedenstellend ist, kann sie für die in dieser Untersuchung erarbeiteten Aussagen dennoch als ausreichend genau betrachtet werden. Es ist jedenfalls davon auszugehen, dass die Simulationen die effektiven NO<sub>x</sub> Emissionen um ein Vielfaches überschätzen.

## 6.2 ECSES 12X62DF-Modellerweiterung und -anwendung

Der letzte Schritt ist die Erweiterung des 6-Zylinder-Modells auf das in diesem Projekt genauer betrachtete 12-Zylinder-Modell mit allen relevanten Systemkomponenten. Da es sich bei dem ECSES-Projekt um eine Fallstudie für zukünftige Anwendungen handelt, werden einige Annahmen in Bezug auf die Grenzen des Motors getroffen, um dessen Leistung in dieser spezifischen Anwendung so weit wie möglich zu optimieren. In diesem Fall wird sowohl der Diesel- wie auch der Gasbetrieb als WKK-Anlage simuliert, d.h. bei einer

Drehzahl von 107.1 U/min. Die Drehzahl wird entsprechend der Generator Spezifikationen gewählt und ermöglicht somit einen möglichst effizienten, kosten- und wartungsgünstigen Betrieb.

### **6.2.1 Diesel Betrieb**

Für den Dieselbetrieb mit MDO können hinsichtlich einer potenziellen Leistungsoptimierung für eine WKK-Anwendung Annahmen getroffen werden, welche leicht von der klassischen Anwendung eines solchen Konzepts im Marinebereich abweichen. Mit diesen Grenzwerten für den Motor werden Simulationen durchgeführt, um relevante Betriebsparameter zu optimieren und damit den Brennstoffverbrauch sowie NO<sub>x</sub> Emissionen zu minimieren. Im Dieselbetrieb muss hinsichtlich der Einhaltung der LRV speziell auf NO<sub>x</sub> Emissionen geachtet werden weshalb die Simulation des Dieselbetriebs einen SCR (Katalysator) zur Reduktion der NO<sub>x</sub> vorsieht. Der NO<sub>x</sub> Ausstoss wird in jeder Simulation mittels der eingedüsten Menge an Harnstoff auf 50mg/Nm<sup>3</sup> begrenzt. Der dazugehörige Harnstoffverbrauch wird in den Betriebskostenrechnungen berücksichtigt.

Da sich Brennstoffverbrauch und NO<sub>x</sub> Emissionen nur schwer synchron optimieren lassen werden hier drei Fälle untersucht:

1. Zunächst wird für minimalen Brennstoffverbrauch optimiert, dazu wird mit einem hohen Verdichtungsverhältnis gefahren wie bei den heutigen Dieselmotoren üblich (Case 1),
2. dann für minimalen Harnstoffverbrauch (sprich tiefen NO<sub>x</sub> Emissionen), hier wird mit einem tieferen Verdichtungsverhältnis gefahren, analog zu einem hoch verdichteten DF Motor (Case 2) und
3. letztendlich wird ein Kompromiss zwischen Brennstoff- und Harnstoffverbrauch erarbeitet mit einem mittleren Verdichtungsverhältnis (Case 3).

Die Ergebnisse dieser drei Simulationen sind in Abbildung 10 zu sehen. Es stehen zahlreiche Parameter zur Verfügung, z.B. der Brennstoffverbrauch, der Harnstoffverbrauch sowie die sich ergebenden Druck- und Temperaturbedingungen im Dieselbetrieb. Hier ist anzumerken, dass durch die Verwendung eines Katalysators die gängigen Grenzwerte eingehalten werden und daher bei einer Optimierung des Motors auf Zylinderdruckverläufe und die Turbineneinlassbedingungen fokussiert werden kann. Eine Betrachtung der hier durchgeführten Berechnung der Betriebskosten, bestehend aus Brennstoff und Harnstoffkosten zeigt, dass ein auf Verbrauch optimierter Motor auch unter Einhaltung von gängigen Emissionsvorschriften am wirtschaftlichsten betrieben werden kann.

Die tagesaktuellen Brennstoffpreise werden von DNV-GL, einer internationalen Klassifikationsgesellschaft, bereitgestellt und der Harnstoffpreis von einem internen Lieferanten mit einem angenommenen Rabatt von 25% auf den Schiffspreis bezogen. Der Rabatt kommt durch die Grossaufträge bei der Kraftwerksanwendung zustande. Als Referenz sind die vollen Preise angegeben:

- Marine Diesel Oil (MDO, schwefelarm): 650 CHF/Tonne
- Harnstoff: 280 CHF/Tonne

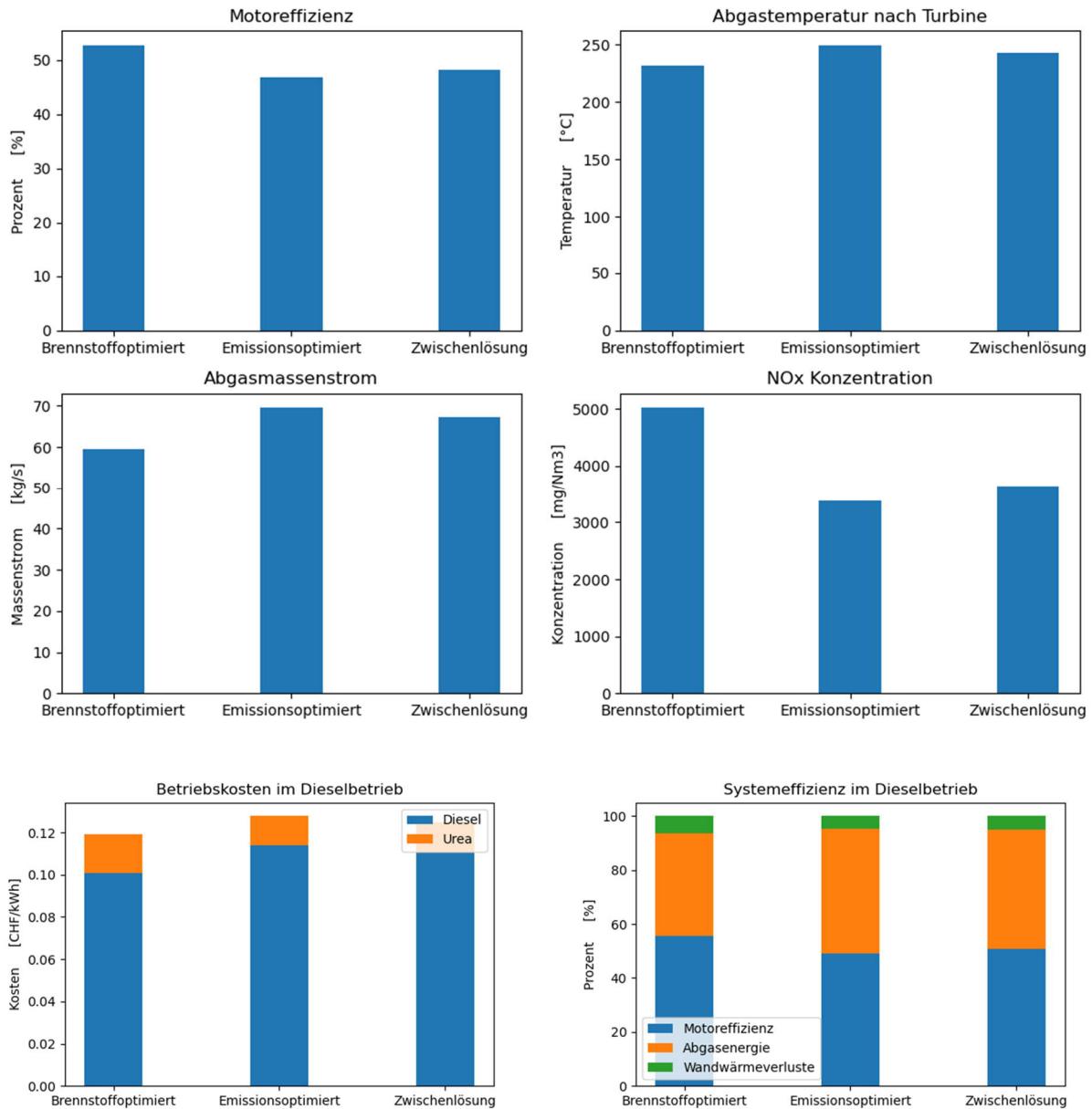


Abbildung 12: Ergebnisse für die drei Optimierungsfälle (1: Brennstoffoptimiert, 2: Emissionsoptimiert, 3: Zwischenlösung) im Dieselbetrieb.

## 6.2.2 Gas Betrieb

Die für den Gasbetrieb gewählten Grundeinstellungen des Motors für die entsprechenden Simulationen sind die Gleichen wie für den Dieselbetrieb, allerdings wird hier das maximale Verdichtungsverhältnis begrenzt. Da im Gasbetrieb mit sehr niedrigen NO<sub>x</sub> Emissionen zu rechnen ist werden die Simulationen zunächst auf eine Verbrauchsoptimierung ausgelegt. Den grössten Einfluss auf den Verbrauch haben in diesem Zusammenhang die Auslassventilsteuerzeiten, welche im Folgenden für vier Fälle untersucht wird. Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich zwischen den vier untersuchten Konfigurationen der Ventilsteuerzeiten keine grossen Unterschiede ergeben. Insbesondere bleiben der Brennstoffverbrauch und

der Motorwirkungsgrad nahezu gleich und somit bleiben auch die Betriebskosten für Brennstoff konstant. Die simulierten NO<sub>x</sub> Emissionen<sup>1</sup> liegen oberhalb der von der LRV vorgegebenen Grenzwerte von 100 mg/Nm<sup>3</sup>. Wie aus dem Vergleich von Messung & Rechnung (Abbildung 11) ersichtlich sind die effektiv zu erwartenden Emissionen dennoch innerhalb der LRV-Grenzwerte. Für Massnahmengebiete, in welchen die Einhaltung eines Grenzwertes von 50 mg/Nm<sup>3</sup> einzuhalten ist, müsste der Motor im Gasbetrieb allerdings zusätzlich mit einem Abgasnachbehandlungssystem ausgestattet werden. Aufgrund der niedrigen Abgastemperatur würde sich hier ein Hochdruckkatalysator anbieten, welcher dem Turbolader vorgeschaltet ist.

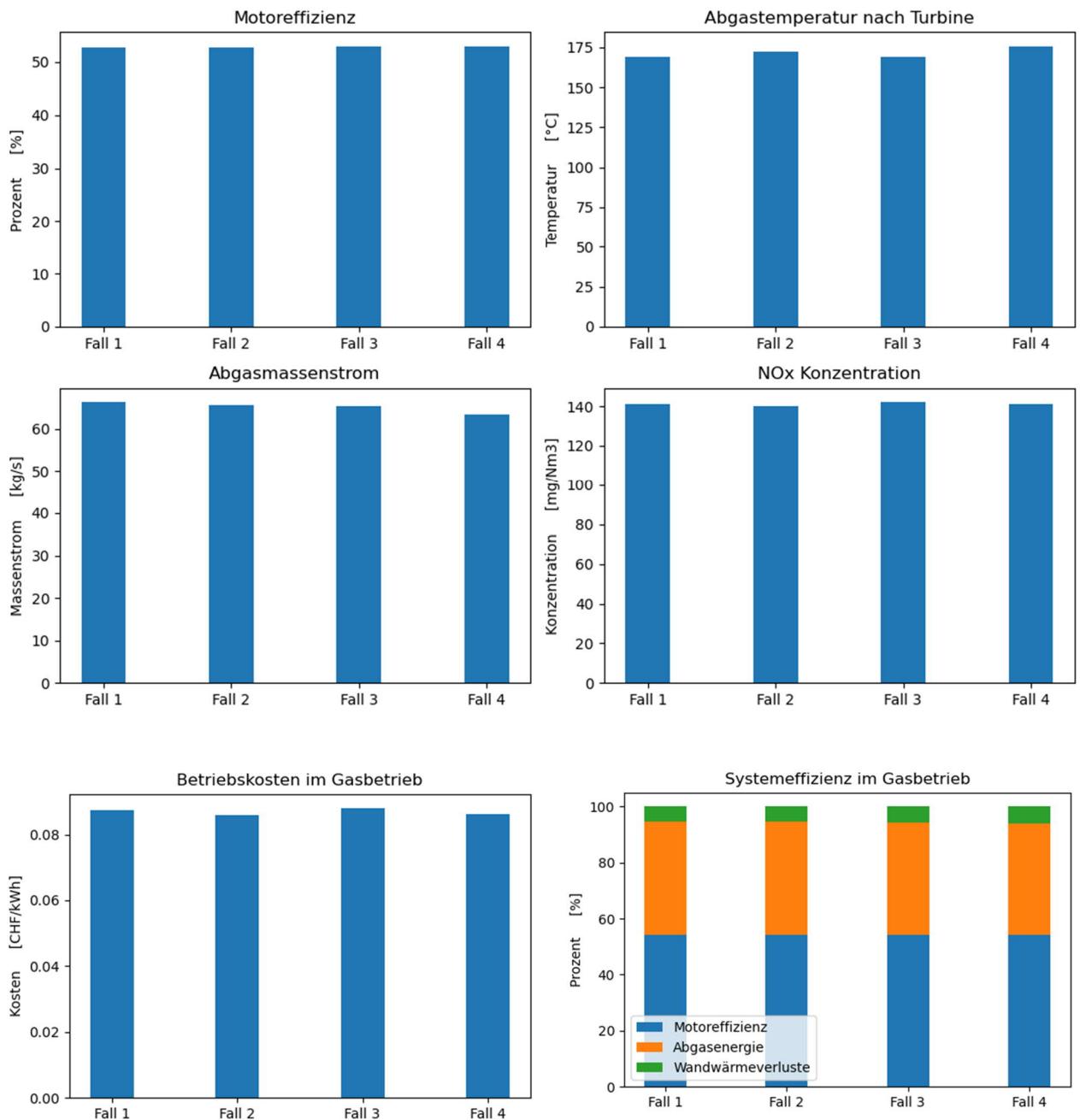


Abbildung 13: Simulationsergebnisse für die Optimierungsfälle im Gasbetrieb

<sup>1</sup> Ungefährre Umrechnung von NO<sub>x</sub> Konzentrationen:  $50 \text{ mg/Nm}^3 \cong 25 \text{ ppm} \cong 0.3 \text{ g/kWh}$

### 6.3 Modell zur Abschätzung der Abwärme Rückgewinnung

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen geht hervor, dass sich der Gesamtwirkungsgrad des Motors aufgrund der noch im Abgas verbleibenden thermischen Energie verbessern lässt. Dazu wird, hauptsächlich für den Dieselbetrieb, ein System zur Rückgewinnung von Wärme eingesetzt. In Abbildung 14 ist ein allgemeines System dargestellt, bei dem mithilfe eines Wärmetauschers Enthalpie an das Arbeitsfluid übertragen wird, welches via Turbine expandiert wird um mechanische Arbeit zu leisten.

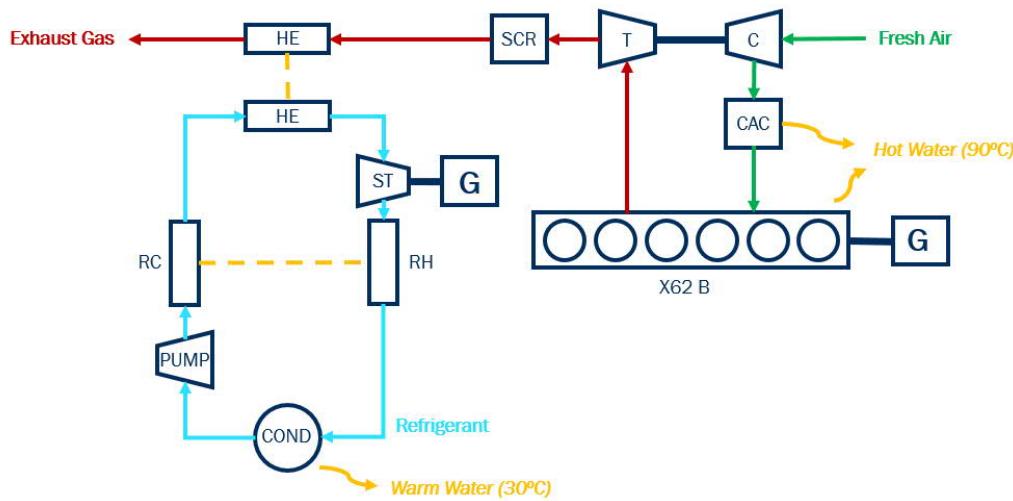


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Motors mit gekoppeltem WHR

Um den Rückgewinnungsgrad eines solchen Systems zu erhöhen wird anstelle von Dampf ein organisches Kältemittel als Arbeitsmedium verwendet, daher der englische Name «Organic Rankine Cycle». Ein gängiges Kältemittel für solche Fälle ist das R245fa, welches aufgrund der Vergleichbarkeit auch in dieser Simulation Anwendung findet. Für eine konkrete Anwendung könnten eventuell Betriebsmittel gewählt werden, welche im Falle eines Zwischenfalls ein geringeres Treibhauspotential aufweisen.

#### 6.3.1 ORC – «Organic Rankine Cycle»

Das Wärmerückgewinnungssystem sollte so ausgelegt sein, dass es für Diesel- und Gasbetrieb möglichst viel Wärme nutzt und flexibel auf die jeweilige Betriebsart (Diesel-, Gas- oder Mischbetrieb) eingestellt werden kann. Aus den bisherigen Simulationsergebnissen ist ersichtlich, dass der Gasbetrieb wesentlich niedrigere Abgastemperaturen erzeugt als der Dieselbetrieb. Um das System möglichst flexibel zu gestalten wird auf einen zweistufigen Ansatz zur Wärmerückgewinnung gesetzt. Hierbei ist es möglich die zweite Stufe mit Hilfe eines Vorwärmers deutlich in seiner Leistung zu steigern. Zur Vorwärmung kann die Wärme der heißen Druckluft vor dem Ladeluftkühler (CAC) genutzt werden. Abbildung 15 zeigt das Schema der ersten bzw. zweiten Stufe des hier untersuchten Wärmerückgewinnungskonzepts.

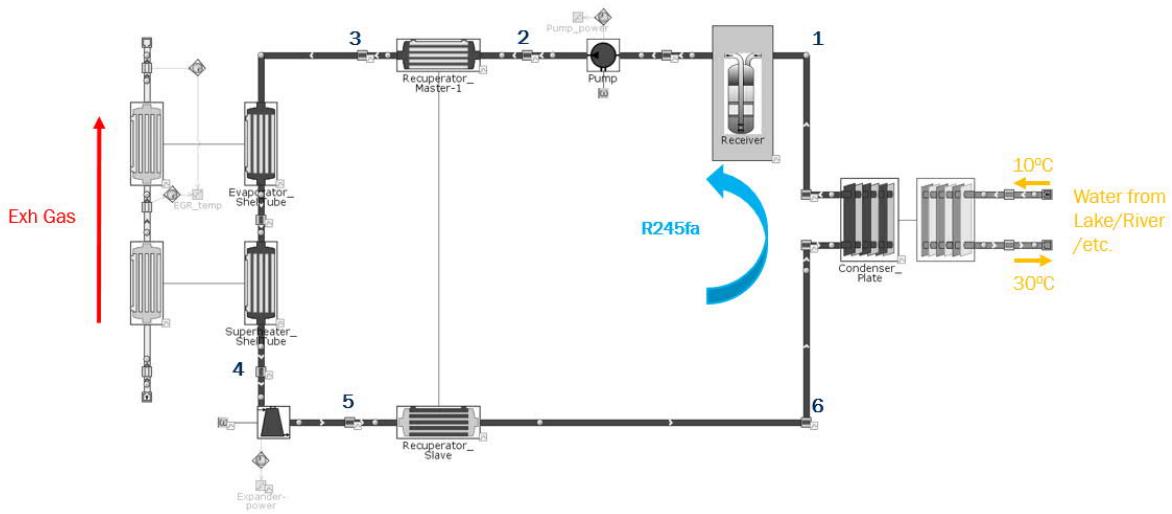


Abbildung 15: Schematische Darstellung der zweistufigen Ausführung des Wärmerückgewinnungssystems Konzepts

In beiden Stufen gibt es einen internen Kreislauf des Kältemittels. Dieser beinhaltet einen internen Wärmetauscher oder Rekuperator, welcher Wärme vom heissen Abgas auf das unter Druck stehende Kühlmittel überträgt. Die zweite Stufe ist hilfreich für die Flexibilität des Systems, es erlaubt die Randbedingungen wie Temperatur, Druck und Durchfluss für Diesel-, Gas-, oder Mischbetrieb anzupassen. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Anordnungen der beiden Stufen des Wärmerückgewinnungssystems für den Diesel- sowie Gasbetrieb.

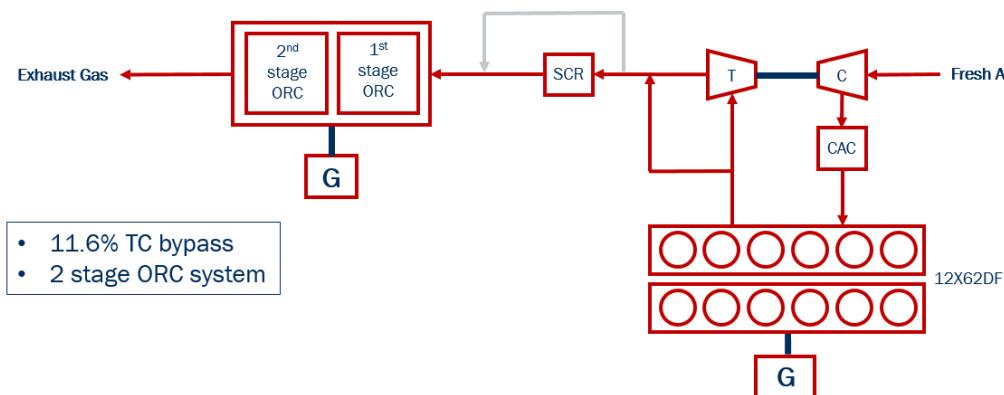


Abbildung 16: Wärmerückgewinnungssystems im Dieselbetrieb

Im Dieselbetrieb in Abbildung 16 werden nach dem SCR beide ORC Stufen benutzt. Dies erlaubt es die maximale Energie aus dem Abgas zu ziehen.

Im Gasbetrieb in Abbildung 17 wird der SCR überbrückt, da aufgrund der Vormischverbrennung die Emissionsvorschriften eingehalten werden können. Mit der zweiten Stufe des ORC kann die restliche thermische Energie im Abgas noch in mechanische Arbeit umgewandelt werden.

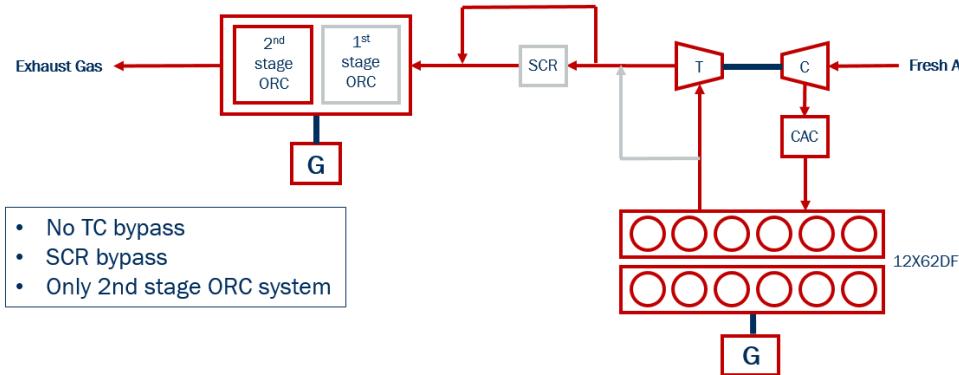


Abbildung 17: Wärmerückgewinnungssystems im Gasbetrieb

Tabelle 3 zeigt die entsprechenden Abgastemperaturen der für beide Betriebsarten verwendeten Systeme. Die Zahlen stammen aus Simulationen mit den früher in diesem Bericht vorgestellten Modellen und der entsprechenden Erweiterung mittels der beiden Stufen des ORC-Systems.

	Dieselbetrieb	Gasbetrieb
Abgasmassenstrom [kg/s]	51	62
Abgastemperatur vor SCR [°C]	300	197
Abgastemperatur nach SCR [°C]	325	197
Abgastemperatur nach erster Stufe ORC [°C]	182	197
Abgastemperatur nach zweiter Stufe ORC [°C]	167	177

Tabelle 3: Betriebsparameter im Diesel- und Gasbetrieb

Die Simulationen zeigen, dass mittels der beiden Stufen des ORC-Systems, im Dieselbetrieb eine erhebliche Wärmemenge ( $\Delta T = 158 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aus dem Abgas in Arbeit umgewandelt werden kann und sich hier das ORC-System bezahlt macht. Im Gasbetrieb jedoch, bei welchem nur die zweite Stufe des ORC zur Anwendung kommt, kann die Temperatur nur um 20°C reduziert werden.

### 6.3.2 Gesamtwirkungsgrad – Nutzung der Restenthalpie und Anergie

Angesichts der Tatsache, dass Kraftwerke Wärme auch in Form von heissem und warmem Wasser in das Verbrauchernetz einspeisen können, wurden einige Berechnungen durchgeführt, wie viel überschüssige Wärme vom Kühlkreislauf des Motors und vom Ladeluftkühler übertragen werden kann. Diese Energie kann in ein dezentrales thermisches Netz eingespeist werden und kann z.B. in Form von Heisswasser als Fernwärme (90°C) genutzt werden. Zudem kann die Restwärme des Ladeluftkühlers in einem Anergiennetz (30°C) genutzt werden [5]. Damit lässt sich der Gesamtwirkungsgrad einer WKK-Anlage erhöhen und in einer entsprechenden Enthalpie Bilanz darstellen. Abbildung 18 zeigt die Wärmebilanz für einen Zweitakt Dual-Fuel-Motor im Dieselbetrieb, inkl. der Wärmerückgewinnung mittels ORC. Speziell an diesem Beispiel ist die zusätzliche Wärmeenergie, die durch die Verwendung des SCR zur Verfügung steht. Die Eingangsenergie stammt zu 96.5% aus dem Brennstoff und etwa 3.5% aus der SCR-Wärme, die sich aus der exothermen Harnstoff Reaktion ergibt.

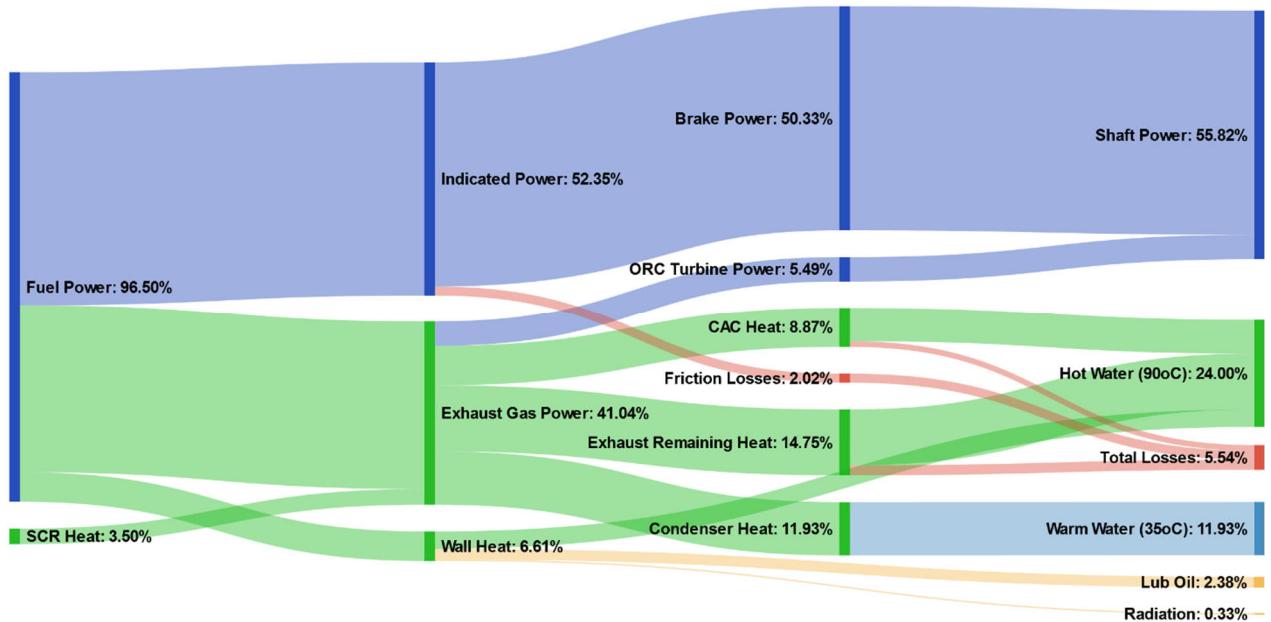


Abbildung 18: Enthalpiebilanz eines langsam laufenden Dual Fuel Zweitaktmotors mit Wärmerückgewinnungssystems im Dieselbetrieb

Dies sollte berücksichtigt werden, da diese Wärme zur Erzeugung von Wellenleistung im ORC-System verwendet wird. Die eingehende Energie wird in mechanische Energie zur Stromerzeugung, in thermische Energie für die Wärmegegewinnung und Verlustenergie aufgeteilt. Die Verlustenergie wird weiterhin in nicht mehr umwandelbare Abgasenergie sowie Reibungsverluste unterteilt wobei letztere erfahrungsgemäss im Bereich zwischen 1.5 und 3% der Gesamtleistung liegen.

Abbildung 19 zeigt die Enthalpiebilanz für den Motor im Gasbetrieb mit Wärmerückgewinnungssystem.

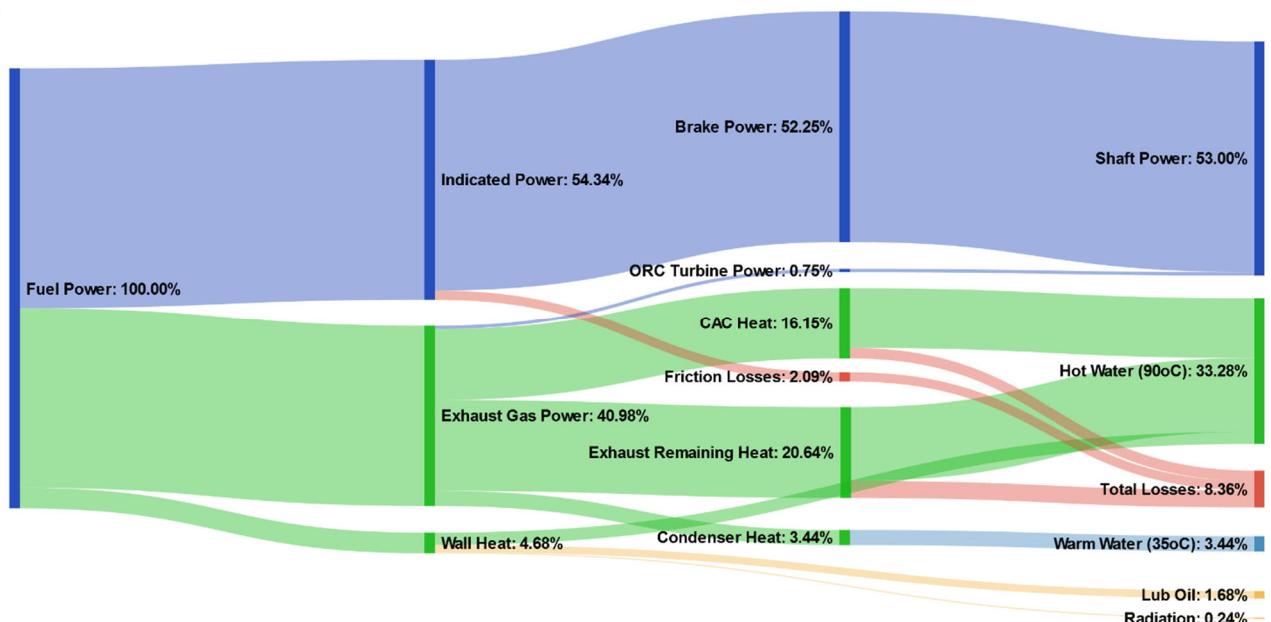


Abbildung 19: Enthalpie Bilanz eines langsam laufenden Zweitaktmotors mit Wärmerückgewinnungssystem im Gasbetrieb

Die Ergebnisse zeigen, dass im Dieselbetrieb ein leicht höherer Anteil der Gesamtenergie in mechanische Energie umgewandelt wird als im Gasbetrieb. Dies liegt zum einen an den brennverfahrensbedingten tieferen Abgastemperaturen im Gasbetrieb, was im Vergleich zum Dieselbetrieb zu einer niedrigeren Umwandlungsrate im ORC-System führt. (ORC Turbine Power: 0,75%). Zum anderen steht im Gasbetrieb prozessbedingt eine grössere Menge an thermischer Energie aus dem Ladeluftkühler (CAC – Charge Air Cooler) zur Verfügung. (CAC Heat: 16,15%). Dieser Umstand könnte dazu verwendet werden die Betriebsart des Motors in einem wärmegeführten Betrieb anzupassen und die WKK-Anlage bei erhöhtem Wärmebedarf im Gasbetrieb zu fahren.

Berücksichtigt man die Investitionskosten des Wärmerückgewinnungssystems unter der Annahme den Motor lediglich mit Gas betreiben zu wollen, macht es durchaus Sinn auf WHR zu verzichten, da der Gewinn an zusätzlich nutzbarer mechanischer Energie nicht im Verhältnis zu den Investitionskosten steht.

Abbildung 19 zeigt dementsprechend die Enthalpie Bilanz im Gasbetrieb ohne Wärmerückgewinnungssystems.

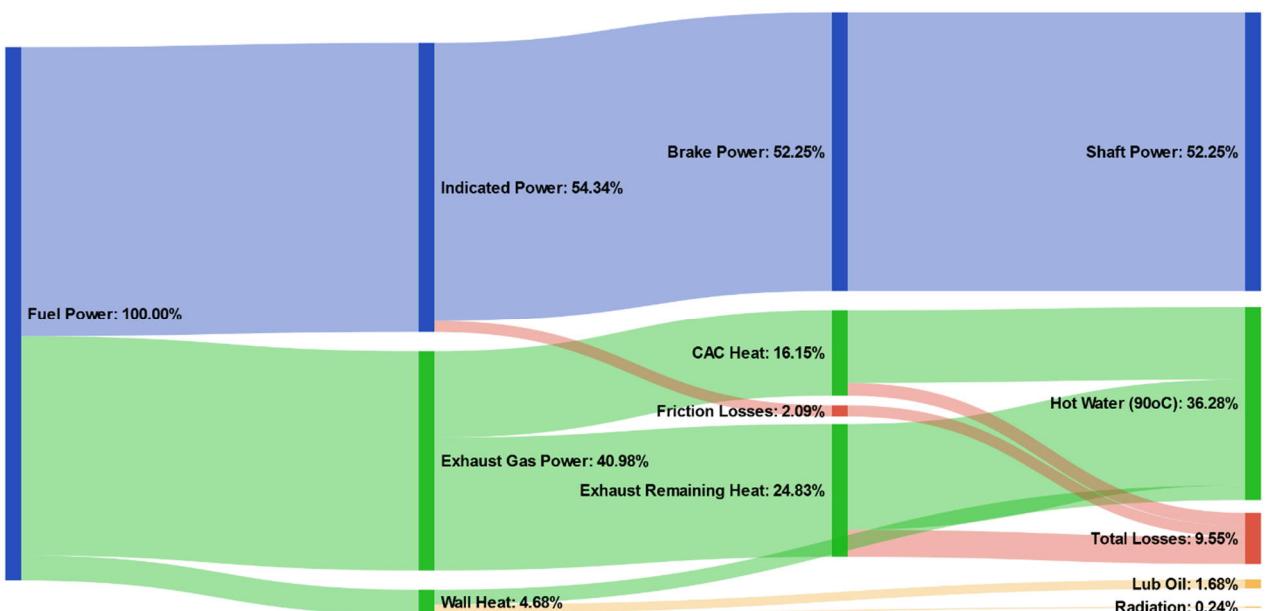


Abbildung 20: Enthalpie Bilanz eines langsam laufenden Zweitaktmotors ohne Wärmerückgewinnungssystems im Gasbetrieb

Ein ausschliesslich im Gasmodus betriebener Motor könnte es ermöglichen, auf das kostenintensive Abgasnachbehandlungssystem zu verzichten und anstatt eines komplexen Brennstoffsysteins, wie es beim Dieselbetrieb verwendet wird, ein vereinfachtes Piloteinspritzsystem zu verwenden was die Investitionskosten und Wartungskosten günstig beeinflussen würde. Sollen jedoch die Vorteile dieses Motors (Brennstoffvielfalt und gemischte Nutzung von Brennstoffen) vollständig ausgenützt werden, ist eine adäquate Abgasnachbehandlung und die Flexibilität durch das zusätzliche Einspritzsystem unumgänglich. Tabelle 4 gibt einen Überblick der installierten Leistung, sowie der Wirkungsgrade und ermöglicht einen direkten Vergleich der beiden Betriebsarten mit Hinblick auf beschaffungsrelevante Parameter.

Motorenkonzept	Dieselmotor +WHR	Diesel ohne WHR	DF +WHR	DF +WHR	DF ohne WHR
Betriebsart	Diesel	Diesel	Diesel	Gas	Gas
Ausgangsleistung [MW]	35.5	33.8	29.2	25.2	25.0
Mechanischer Wirkungsgrad	56%	51%	51%	52%	51%
Thermischer Wirkungsgrad	24%	36%	24%	33%	35%
Gesamtwirkungsgrad	80%	87%	75%	85%	86%

Tabelle 4: Vergleich zwischen Diesel- und Gasbetrieb mit und ohne Waste Heat Recovery

Bei einer rein thermodynamischen Betrachtung wäre ein im Dieselmodus betriebener X-Motor inkl. Abgasnachbehandlungssystem und Waste Heat Recovery-System die beste Option. Diese würde durch die installierte Leistung, wie auch aufgrund des hohen Wirkungsgrades die besten Resultate bieten. Wir werden jedoch in der Wirtschaftlichen Betrachtung sehen warum diese Option nur in Kombination mit geschickt gewählten Brennstoffen Sinn macht.

#### 6.4 Emissionen:

Um die hier dargestellte Zweitakt WKK-Anlage auf Ihre Anwendbarkeit in der Schweizer Energielandschaft zu untersuchen, müssen neben der Verfügbarkeit möglicher Brennstoffe auch die daraus resultierenden Emissionen betrachtet werden. In der Schweiz gelten für stationäre Verbrennungsmotoren die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV).

Die Kantone und einzelne Städte können jedoch im Rahmen ihrer individuellen Massnahmenpläne strengere Grenzwerte erlassen und tun dies auch. Darüber hinaus gibt z.B. der Kanton Zürich für Installationen mit Entstickungsanlagen (SCR) einen Grenzwert für Ammoniakemissionen an.

Die hier durchgeföhrten Berechnungen der Zweitakt WKK-Anlage für Diesel- und Gasbetrieb zeigen, dass sich im Dieselbetrieb die LRV bezüglich Stickoxidausstoss nur mit Hilfe einer Entstickungsanlage einhalten lässt. Der daraus resultierende Gegendruck im Abgasstrang ist mit etwa 30 mbar relativ gering und hat daher, mit einem Mehrverbrauch von knapp 1 g/kWh, einen sehr kleinen Einfluss auf den Brennstoffverbrauch respektive Wirkungsgrad. Im Gasmodus hingegen können die vorgeschriebenen Grenzwerte für NO<sub>x</sub> auch ohne entsprechende Entstickungsanlage eingehalten. Zudem lassen neue Entwicklungen WinGD's in diese Richtung [9] weitere Optimierungen zu und erlauben eine zusätzliche Reduktion der Grenzwerte. Diese Technologie erlaubt es teilweise sogar, die noch strengeren Grenzwerte von Gasturbinen zu unterschreiten. Anders stellt sich die Situation in Bezug auf Partikelemissionen dar. Diese können jedoch nur mit einer gewissen Ungenauigkeit in den hier gemachten Simulationen dargestellt werden. Um eine Aussage zur Anwendbarkeit machen zu können wird hier auf eine Technologiestudie über Partikelfilter verwiesen [10] die am Forschungsmotor in Winterthur durchgeföhrt wurde. Da diese Technologie im Abgas von grossen Zweitaktmotoren bis jetzt nicht Stand der Technik ist, werden die Resultate dieser Untersuchung skaliert.

Die Partikelkonzentration im Abgas hängt in erster Linie von der Betriebsweise sowie sehr stark vom verwendeten Brennstoff ab. Ein Vergleich von MDO und HFO zeigt diesen Effekt sehr deutlich. Ein mit HFO betriebener Motor erreicht Partikelfrachten bis zu 150 mg/Nm<sup>3</sup> wohingegen der gleiche Motor bei Betrieb mit MDO lediglich 10-30 mg/Nm<sup>3</sup> an Partikeln emittiert. Im Vormischbetrieb hingegen sinkt die Partikelkonzentration eines vergleichbaren Motors auf deutlich unter 10 mg/Nm<sup>3</sup> [11]. Dies ist der Tatsache

geschuldet, dass der Motor im Gasbetrieb nach dem Prinzip der geschichteten, mageren Vormischverbrennung (Otto-Prinzip) arbeitet. Auf einen Partikelfilter könnte in diesem Fall verzichtet werden [12].

## 7 Vergleich zwischen GUD und Zweitakt betriebener WKK

### 7.1 Effizienz

Die bisher in dieser Untersuchung herausgearbeiteten Vorzüge der Zweitakt betriebenen WKK-Anlage und die Berechnungsergebnisse einer solchen Anwendung deuten auf ein beträchtliches Anwendungspotential hin. Bisweilen wurde der Vergleich zu einem GUD hauptsächlich auf Basis von 4-Takt-WKK-Anlagen durchgeführt. Zweitaktmotoren bieten zusätzliche/andere Vorteile und es ist daher sinnvoll, die Lage mit dem hier beschriebenen Zweitakt Ansatz neu zu beurteilen. Ein solcher Vergleich ist allerdings nicht ganz einfach. Während GUD hauptsächlich darauf ausgelegt sind Strom zu produzieren, fällt bei der thermischen Umwandlung von Brennstoff in motorbetriebenen WKK-Anlagen neben Strom auch noch ein beträchtlicher Teil an nutzbarer Wärme an. Bei reinen Gasturbinen fällt die Abwärme im Abgas bei Temperaturen von 400°C bis 600°C an. Obwohl diese Enthalpie grundsätzlich für Fernwärme verwendet werden könnte, ist deren Nutzung zum Antrieb eines nachgeschalteten Dampfprozesses thermodynamisch viel sinnvoller [25]. Im Prinzip ist auch bei GUD-Anlagen eine weitere Abwärmennutzung möglich, wegen der hohen elektrischen Wirkungsgrade ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung und nicht sinnvoll [25]. Sollen beide Systeme verglichen werden kann daher der erzielbare Gesamtwirkungsgrad auf die theoretisch umsetzbare, thermische Energie bezogen werden. Hierfür wird die erzeugte elektrische Energie mittels Wärmepumpen in Wärme umgewandelt. Die bei dieser Berechnung verwendeten Wärmepumpen weisen eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von vier auf, was die Möglichkeit bietet aus 100% elektrischer Energie 400% thermische Energie für Heizwasseranwendungen zu gewinnen. Mit diesem Ansatz lassen sich nun die energieerzeugenden Systeme einfacher vergleichen. In Abbildung 21 wird dies schematisch dargestellt. Für den Vergleich wurde eine GE 9HA.02 im «Combined Cycle 1x1» betrachtet [26]. Diese erzeugt eine elektrische Leistung von 838 MW und ist somit nicht in der gleichen Leistungsklasse und auch nicht nach unten skalierbar. Der Vergleich soll aber aufzeigen wie sich die höhere Effizienz grösserer Anlagen positiv auf die Gesamtbilanz auswirkt. So wäre im Fall einer solchen Combined Cycle Installation eine maximale Wärmeleistung möglich die 2.56 mal grösser ist als die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie. Für die Viertaktanlage wurde ein Jenbacher J920 [27] als Basis genommen. Dieses Konzept stellt die höchste Leistung in Form von Wärme dar, bei einem immer noch sehr guten mechanischen Wirkungsgrad von über 49%. Der Gesamtwirkungsgrad solcher Installationen kann schnell 90% überschreiten. Beim Vergleich mit einem WinGD X62-DF verdeutlicht sich jedoch sehr schnell, was beim Betrachten der Gasturbine schon ersichtlich wurde: Jede Einbusse an mechanischer Effizienz lässt sich selbst mittels optimaler Ausnutzung der Abgasemission nur schwer wiedergutmachen, selbst wenn fast die gesamte chemische Energie nutzbar gemacht wird.

Wenn man nun aber die meist nötige Skalierung für ein BHKW-Projekt in Betracht zieht (diese sind nur äußerst selten in der Größenordnung von fast einem Gigawatt) und eine benötigte Wärmeleistung von ca. 30 MW anschaut, dann reduziert sich der Wirkungsgrad einer Gasturbine beträchtlich, wie schon Abbildung 1 zu erkennen war. In solch einem Fall würde eine weitaus kleinere Gasturbine zum Einsatz kommen. Beispielsweise eine Siemens SCC-800 im «Combined Cycle 1x1» [28]. Mit einer installierten elektrischen

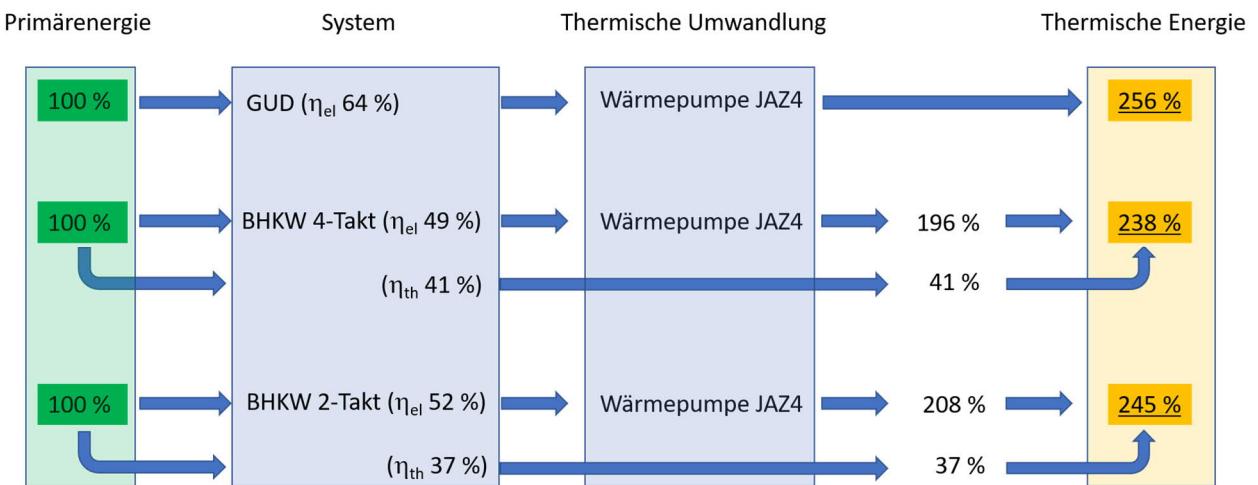


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Umrechnung energieerzeugender Systeme auf thermische Energie unter der Annahme, dass die GUD Anlage keine nennenswerte Abwärme über 90 °C aufweist, welche dem thermischen Ertrag angerechnet werden könnte. [25],[29]

Leistung von 88 MW erreicht diese unter Volllast einen Wirkungsgrad von immer noch 59%. Falls jedoch die Abwärme im Abgas nicht mehr nutzbar gemacht werden kann, würde der thermische Gesamtwirkungsgrad auf 236% sinken, sogar noch unter diejenige des Viertakt-Konzepts, obwohl der mechanische Wirkungsgrad 10 Prozentpunkte darüber liegt.

## 7.2 Flexibilität

Ein weiterer Punkt bei der Auslegung einer WKK-Anlage betrifft das dynamische Verhalten einer solchen Anlage. Um kurzfristige Schwankungen im Stromnetz auszugleichen benötigt man sogenannte Regelenergie. Diese Form der Energie ist teurer und wird deshalb nur kurzfristig und sehr begrenzt eingesetzt. Längere und grössere Abweichungen müssen daher durch das Schalten von zusätzlichen Kraftwerken kompensiert werden. Dabei wird zwischen Grund-, Mittel- und Spitzenlast unterschieden.

Grundlastkraftwerke (z.B. grosse Gasturbinen im Combined Cycle, oder AKWs) sind auf Dauerbetrieb ausgelegt und liefern, abgesehen von Wartungsarbeiten, das ganze Jahr über Energie mit einer sehr hohen Effizienz. Mittellastkraftwerke regeln den Energiebedarf von vorhersehbarem und regelmässigem Mehrbedarf. Treten zusätzlich zur Mittellast weitere, unvorhersehbare Belastungsspitzen auf, müssen diese durch schnell ansprechende Energiesysteme kompensiert werden. Bei der Auslegung eines Kraftwerks muss daher grundsätzlich im Vornherein definiert werden, welche Art von Last in welchem Regelbereich zur Verfügung gestellt werden soll. Dies beeinflusst die angewandte Technologie. Es ist daher von Vorteil eine solche Anlage auch im Teillastbereich betreiben zu können. Vor allem die Bereitstellung und der Verkauf von Mittel- und Spitzenlast kann sehr interessant sein.

Unter diesem Aspekt muss man anmerken, dass GUD im Teillastbereich erheblich an Wirkungsgrad verlieren

und daher eigentlich ausschliesslich im Vollastbereich zu betreiben sind [30]. Die auf einem Zweitaktmotor basierende WKK-Anlage hingegen weist über den möglichen Lastbereich zwischen 40% und 100% (kurzzeitig sogar 110%), einen vergleichsweise konstanten Wirkungsgrad auf, wie in Abbildung 22 ersichtlich ist. Im Vergleich dazu haben sowohl Viertaktmotoren wie auch die Gasturbine ihre maximale Effizienz erst bei Volllast. Im Teillastbereich sind beide Technologien weniger effizient als ein Zweitaktmotor und hin zu kleinen Lasten verstärkt sich dieser Trend sogar noch.

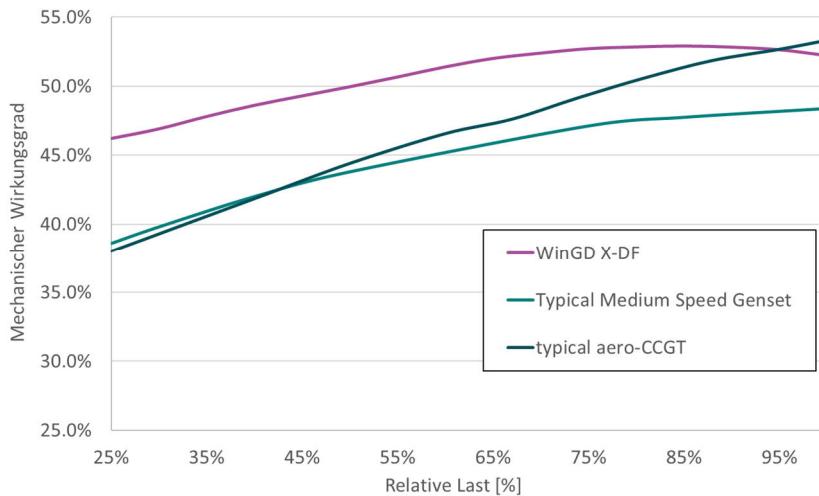


Abbildung 22: Lastabhängigkeit von Wirkungsgraden von GUD und Zweitakt WKK-Anlage [27], [28]

Diese Tatsache erlaubt interessante Anwendungen in Bereich der Regelenergie. Ein Zweitaktmotor könnte z.B. bei 75% Strom und Wärme produzieren und bis zu 25% seiner Leistung als Reserve vorhalten, welche bei Bedarf sehr schnell abgerufen werden kann.

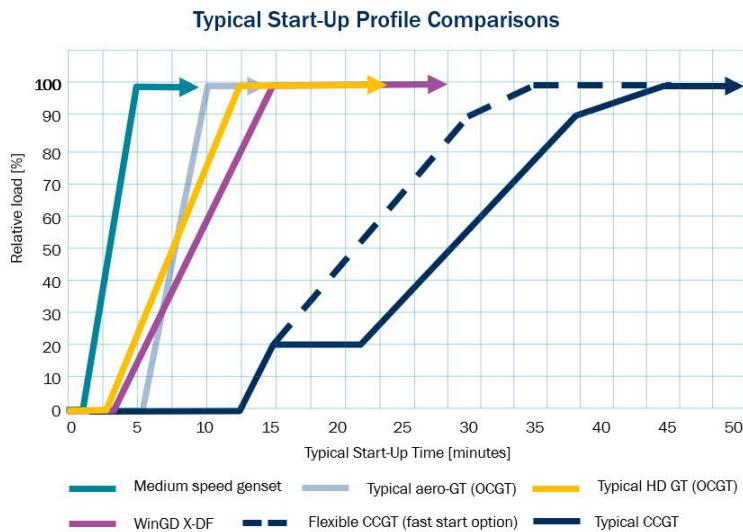


Abbildung 23: Ansprechzeiten verschiedener energieerzeugender Systeme [30], [31]

Hierbei muss man auch die Ansprechzeiten der verschiedenen Systeme betrachten. Abbildung 23 zeigt verschiedene Technologien und ihre jeweilige Ansprechzeit. Ein mittelschnelllaufender Viertaktmotor kann

sehr schnell von null auf Volllast gebracht werden. Solche Anlagen können bei vorgewärmten Motoren, in unter zwei Minuten volle Leistung bringen, das heisst bei entsprechender Skalierung der Anlage mehrere Hundert Megawatt in wenigen Minuten zu- oder abschalten. Dies ist eine der grossen Stärken dieser Technologie, mit welcher weder Gasturbinen noch Zweitaktmotoren mithalten können. Gasturbinen haben ihre Stärke in der kontinuierlichen Grundlastversorgung, bei der sie mit der höchst möglichen Effizienz Strom produzieren. Der Zweitaktmotor liegt zwischen diesen beiden Extremen, resp. bietet die beste Verbindung der Vorteile beider Technologien. soll die so gebotene Flexibilität in Kombination mit sehr hoher Effizienz aufzeigen.

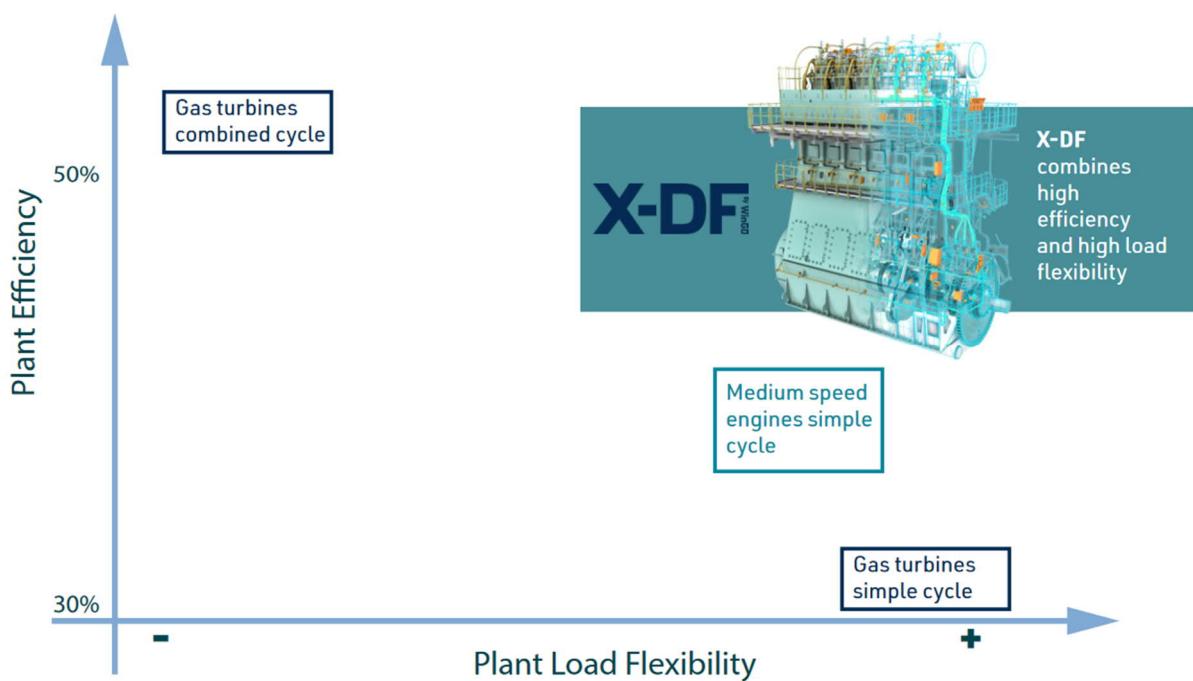


Abbildung 24: Flexibilität und Effizienz der verschiedenen Systeme

Das Ansprechverhalten des Zweitaktmotors hängt in erster Linie von den Bauteiltemperaturen ab. Ist ein Motor auf Betriebstemperatur kann ein Lastwechsel innert kürzester Zeit erfolgen. Ist der Motor jedoch auf Standby kann es bis zu 15 Minuten dauern bis er Volllast erreicht. Hierzu ist anzumerken, dass hierfür alle Systeme auf Temperatur gehalten werden müssen (wie auch bei den Viertaktmotoren), was einen entsprechenden Energieverlust bedeutet. Diese Stärken und Schwächen des Zweitaktmotors empfehlen darum auch eine andere Art der Anwendung als die bislang diskutierten. Diese Motoren können bei rund 75% Last sehr effizient Strom produzieren. Falls nötig kann er schnell auf Lastwechsel im Bereich von  $\pm 25\%$  reagieren. Das bedeutet bei einem einzelnen Motor, je nach Grösse und Zahl der Zylinder, eine elektrische Regelleistung von  $\pm 4.5 \text{ MW}$  bis zu  $\pm 12.5 \text{ MW}$ . Damit stellt ein solches Konzept ein hoch flexibles Regelement mit positiver wie negativer Reserve dar und bietet damit ein ausgezeichnete Kompensationsmöglichkeit für fluktuierende, erneuerbare Quellen wie Wind- und Sonnenenergie. Dies ist gerade in Verbindung mit der Wärmeproduktion sehr wichtig. Während der Nacht zum Beispiel, wenn der Strombedarf reduziert, die Wärme zum Heizen aber benötigt wird, können Zweitaktmotoren die Leistung reduzieren und mittels Anpassung motortechnischer Parameter die Energie vermehrt Richtung Wärme leiten. Wie wichtig eine flexible Energieproduktion ist zeigt Abbildung 25. Bei der angestrebten Ausweitung von

erneuerbaren Energien ist eine flexible Stromproduktion wichtig, und in Zukunft gerade auch bei der Grundlast. Wie auch in der Natur ist eine Diversifizierung der energieumwandelnden Systeme nötig. So können Batterien kurzzeitige Spitzen abfangen und den etwas trügeren, aber hocheffektiven Systemen die nötige Zeit geben, um die benötigte Leistung abzurufen.

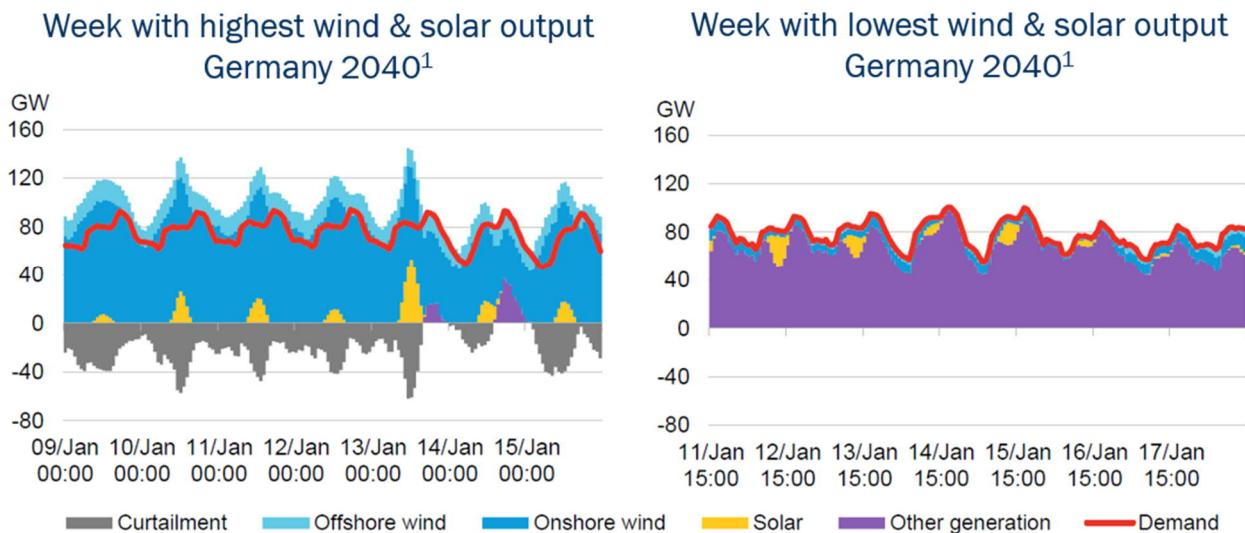


Abbildung 25: Mögliche Zukunftsszenarien bei vermehrter Nutzung von Wind und Sonne [32]

### 7.3 Investitions- und Wartungskosten von WKK-Anlagen

Die nachfolgend dargestellten Kosten von WKK-Anlagen basieren auf Angaben in der aufgeführten Literatur [33]. In Tabelle 5 sind die Investitions- sowie Wartungskosten für verschiedene energieumwandelnde Systeme dargestellt. Die Angaben zu den Investitionskosten beziehen sich auf Motor und Generator und falls vorhanden Wärmerückgewinnung sowie Abgasnachbehandlungssystem wo nötig. Bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden Wärmespeicher, Spitzenlastkessel, Gebäude, Anschluss an die Netze, Training, Installationskosten etc. Das heisst es handelt sich nicht um schlüsselfertige Anlagen.

	Investitionskosten	Wartungskosten
	[CHF/kW]	[Rp/kWh]
4 Takt WKK Gasmotor	550	0.48
2 Takt WKK Diesel	392	0.19
2 Takt WKK DF	563	0.19
GUD ohne Wärmenutzung	478	0.76
ORC (3 MW, für X62-DF)	1'000	0.05

Tabelle 5: Kostenübersicht WKK-Anlagen, bezogen auf die elektrische Leistung, resp. Energie [25]

Mit Hilfe dieser Kostenübersicht lassen sich die verschiedenen Systeme hinsichtlich ihrer elektrisch installierten Leistung vergleichen. Auffallend sind die sehr hohen leistungsspezifischen Investitionskosten für eine ORC-Anlage gegenüber den sehr niedrigen Wartungskosten. Die Kosten einer solchen Anlage skalieren in dieser Größenordnung noch nicht so stark mit der umgesetzten Leistung. Für die Nutzung der Restwärme sind sehr grosse und effektive Wärmetauscher nötig, ein Kreislauf für das Arbeitsmedium und eine zusätzliche

Turbine. Dies und die Tatsache dass schon ein sehr effektiver Prozess davor geschaltet ist, erklärt die hohen spezifischen Kosten. Auch Zweitaktmotoren selbst haben sehr tiefe Wartungskosten. Jedoch sind im Vergleich zu den Viertaktmotoren und Gasturbinen und je nach Ausführung höhere Investitionskosten zu erwarten. Der grosse Unterschied zwischen reiner Diesel- und DF-Anwendung liegt in der höheren Leistungsdichte bei gleichzeitig kleineren Investitionskosten des reinen Dieselmotors im Vergleich zu der Dual-Fuel-Tauglichkeit. Eine Gasturbine hat in dieser Form die niedrigsten energiespezifischen Installationskosten. In Verbindung mit dem höchsten mechanischen Wirkungsgrad bietet sie auf den ersten Blick interessante Vorteile. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte sind Gasturbinen relativ preiswert zu installieren. Ihr Unterhalt ist aber sehr teuer, gerade im Vergleich mit Zweitaktmotoren ist hier ein grosser Unterschied zu erkennen. Zweitaktmotoren sind zwar in der Beschaffung etwas teurer, punkten aber danach im Betrieb mit sehr tiefen Wartungskosten und – dank dem konstant hohen Wirkungsgrad – mit vergleichbar niedrigen Betriebskosten.

## 7.4 WKK im Kontext der Elektrizitätserzeuger

Um die Wirtschaftlichkeit der ECSES-Anlage genauer untersuchen zu können und einen Vergleich zu ermöglichen, werden drei Konzepte gegenübergestellt. Basierend auf fossilen Brennstoffen wurde jeweils ein marktüblicher Vertreter der verschiedenen Systeme gewählt. Dabei werden die Gestehungs- bzw. Produktionskosten für Strom und Wärme, sowie die sogenannten Konvertierungskosten der einzelnen Erzeuger berechnet. Als Konvertierungskosten werden die Gestehungskosten für Elektrizität und Heiz-Wärme bezeichnet, jedoch werden bei der Berechnung die Brennstoffkosten auf null gesetzt. Die Kapitalkosten sowie sonstige Betriebskosten wie Harnstoff, Schmieröl, etc. fliessen in der Berechnung der Konvertierungskosten mit ein, analog zur Berechnung der Gestehungskosten. Mittels der Konvertierungskosten kann, unabhängig vom verwendeten Brennstoff und möglichen Preisunterschieden, ein Vergleich Energieumwandelnden Systeme erstellt werden. Eine Übersicht der Gestehungs- und Konvertierungskosten ist in Tabelle 6 dargestellt. Zur leichteren Interpretation wurde zudem die Effizienz der Systeme eingefügt. Als Preisgrundlage wurde ein Gaspreis von 4.8 Rp/kWh und ein Heizölpreis von 7.3 Rp/kWh angenommen.

	4-Takt WKK	2-Takt WKK	GUD	
				6xJMS920    3x12X62DF    1xSGT-800
Mechanischer Wirkungsgrad [%]	48.7	51	60	
Konvertierungskosten Elektrizität [Rp/kWh]	0.88	0.67	0.87	
Konvertierungskosten Wärme [Rp/kWh]	1.93	1.78	2.02	
Gestehungskosten Elektrizität [Rp/kWh]	4.41	4.10	4.20	
Gestehungskosten Wärme [Rp/kWh]	9.72	10.83	9.77	

*Tabelle 6: Vergleich der energiespezifischen Umwandlungskosten (pro kWh elektrisch, resp. kWh Wärme)*

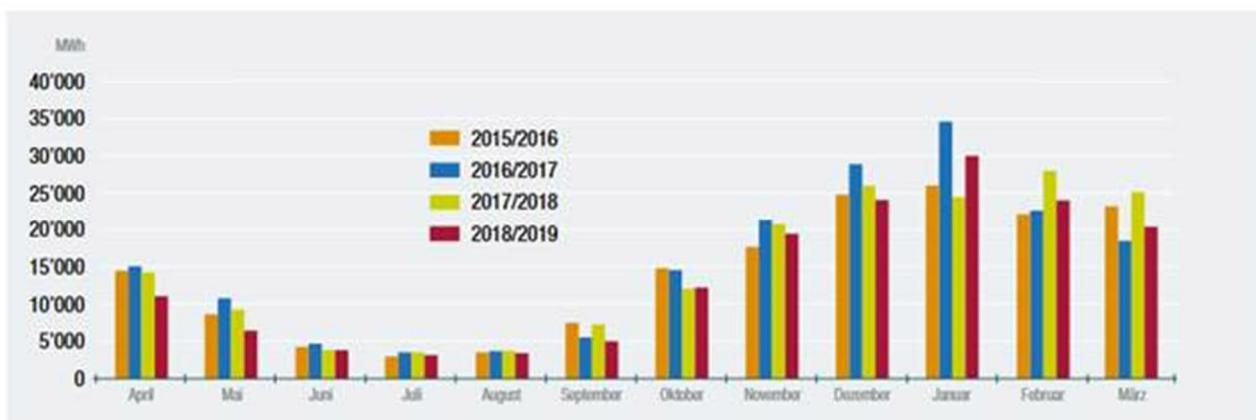
Bei deren Betrachtung werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme ersichtlich: Im Gasbetrieb hat ein X-DF-Motor einen leicht besseren Wirkungsrad verglichen mit einer Viertaktmaschine. Hierbei muss angemerkt werden, dass der Vergleich bei 100% Last gemacht wurde. Der aufmerksame Leser hat jedoch in Abbildung 22 erkannt, dass das Maximum einer Zweitaktmaschine bei etwas tieferen Lasten liegt, daher stellt dies eine eher konservative Betrachtung dar. Einen deutlichen Vorsprung hat die Gasturbine im kombinierten

Zyklus. Wichtiger an dieser Stelle sind jedoch die effektiven Kosten, die dem Betreiber entstehen. Hier wird unterschieden zwischen den Kosten pro Kilowattstunde Strom und Wärme. Dabei wurden die Anteile an den Kosten für die jeweilige Energieform 50/50 verteilt. Aufgrund der tiefen Wartungs- und nur leicht höheren Investitionskosten des Zweitaktmotors, sind die Konvertierungskosten sowohl bei Strom wie auch Wärme die niedrigsten. Auffallend sind die hohen Wärmekosten für das GUD. Der Grund dürfte im relativ kleinen Anteil an Wärme liegen, der produziert wird. Bei den Gestehungskosten wiederum fließt die Effizienz der Anlage mit ein. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades ist die GUD hier wieder die beste Variante bei der Produktion von Strom, wenn auch nur knapp. Die Viertaktvariante hat die tiefsten Gestehungskosten bei der Bereitstellung von Wärme. Aber in beiden Fällen liegt der Zweitaktmotor sehr nahe beim Optimum und wie sich schon bei der Effizienzberechnung gezeigt hat, bietet die Zweitaktanlage die besten Werte bei der Bereitstellung von Strom und Wärme in Kombination.

## 8 Anwendungsbeispiel: REFUNA

Um eine mögliche Anwendung der hier untersuchten Zweitakt WKK-Anlagen zu demonstrieren, soll als konkretes Beispiel die «Regionale Fernwärme Unteres Aaretal» (REFUNA) mit Energie versorgt werden. Das Beispiel basiert auf einem aktuellen Projekt der Energiedienste Laufenburg und der EDF Schweiz. Diese beabsichtigen in Döttingen (AG) eine grosse WKK-Anlage mit bis zu 50 MW elektrischer Leistung zu realisieren. Dabei soll die Wärme an REFUNA abgegeben werden.

Heute wird das Netz der REFUNA grösstenteils mit Abwärme der Atomkraftwerke Beznau I und Beznau II gespeist. Im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 werden die beiden AKWs jedoch nur noch so lange betrieben wie deren sicherer Betrieb garantiert werden kann: *«Das Schweizer Volk stimmt der Energiestrategie 2050 zu. Es dürfen keine neuen Kernkraftwerke mehr gebaut werden, die bestehenden können weiterbetrieben werden, solange sie sicher sind.»* aus (<https://www.refuna.ch/ueber-uns/geschichte>) Für diesen Fall bereitet sich die REFUNA vor, so zum Beispiel mit der Installation einer mit Holz betriebenen Anlage. Während der Wintersaison 2018/2019 bezog REFUNA 164'786 MWh Wärme. Über 93% davon stammen aus den beiden AKWs, der Rest kommt vom *Holzheizwerk Badstrasse*.



*Abbildung 25: Monatliche Wärmeproduktion für REFUNA*

Bei einem durchschnittlichen täglichen Verbrauch ergibt dies im Winter eine Spitzenleistung von knapp 50 MW. Hiervon stammen etwa 7% aus dem Holzheizwerk aus der Badstrasse und der Rest aus den beiden AKWs, deren Wärme es in unbestimmter Zukunft zu ersetzen gilt.

## 8.1 Konzeptueller Ansatz

Der hier untersuchte 12X62DF Motor mit 25,7 MW Ausgangsleistung und 35% thermischem Wirkungsgrad gibt im Gasbetrieb etwa 21MW Heizleistung ab. Mit 3 Motoren könnten somit 62 MW Heizleistung bereitgestellt und damit die von Beznau 1 und 2 genutzte Abwärme ersetzt werden. Somit wäre der Wärmebedarf für die Wintermonate im Verbund mit dem *Holzheizwerk Badstrasse* mehr als abgedeckt. Die Überkapazität bietet eine gewisse Reserve für eventuelle Netzerweiterungen und mit der Möglichkeit der Tuning-Anpassung des Motors eine Redundanz.

Der modulare Aufbau einer solchen WKK-Anlage mit drei Motoren ermöglicht es in den Sommermonaten einzelne Motoren abzuschalten und für Wartungsarbeiten vom Netz zu nehmen. Zudem erlaubt der Eingriff ins Tuning dieser Maschinen Einfluss auf die Verteilung der Effizienz zu nehmen. So könnte man z.B. während der Sommermonate den Motor zu maximaler mechanischer, resp. elektrischer Effizienz einstellen und während der Wintermonate mehr thermische Energie produzieren. Ein solcher Wechsel könnte unter anderem auch bei der Nutzung verschiedenartiger Brennstoffe genutzt werden.

Die Anlage wird in einem ersten Schritt als eine mit Erdgas betriebene WKK-Anlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Dazu wird die Anlage in das Erdgas- und Fernwärmennetz eingebunden. Diese Anlage wird wärmegeführt betrieben, d.h. die Produktion der Anlage folgt primär dem Wärmebedarf im REFUNA Netz. Im Beispiel wird davon ausgegangen, dass über die Betriebszeit (6'000 h/Jahr) die gesamte Wärmemenge ins Fernwärmennetz abgegeben und verkauft werden kann. In einem zweiten Schritt wird die Dekarbonisierung des Brennstoffes angestrebt, was je nach Wahl des Brennstoffes Modifikationen am Brennstoffsysteams des Motors nötig machen würde.

Dieses Vorgehen ermöglicht eine rasche Realisierung der Anlage und einen Aufbau bzw. Etablierung der Lieferkette für alternative Brennstoffe (z.B. Tierfette). Dieser Brennstoff ist aktuell verfügbar, wird jedoch derzeit noch in anderen Industrien genutzt. Der klare Vorteil im Mehrstoffbetrieb liegt darin, dass die Brennstoffbeschaffung weniger abhängig von Verfügbarkeit und Preis ist. Die Resultate der hier durchgeföhrten Untersuchungen haben gezeigt, dass die von der LRV definierten Grenzwerte für NO<sub>x</sub> von 100 mg/Nm<sup>3</sup> und Partikelemissionen von 10 mg/Nm<sup>3</sup> im Gasbetrieb auch ohne externe Abgasnachbehandlung eingehalten werden können. Entsprechend könnte in diesem ersten Schritt ein Betrieb ohne SCR-Katalysator oder Partikelfilter vorgesehen werden und dieser für eine Verwendung mit alternativen Brennstoffen zu einem späteren Zeitpunkt nachgerüstet werden. Die fehlende Erfahrung mit solchen Brennstoffen lässt zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage betreffend der nötigen Dimensionierung des Abgasnachbehandlungssystems zu und kann deshalb für diese Anwendung nur aufgrund von Erfahrungswerten mit gängigen Brennstoffen abgeschätzt werden.

## **8.2 Wirtschaftlichkeit REFUNA mit ECSES WKK-Anlage**

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der ECSES WKK- Anlage basiert auf der Annahme, dass drei Motoren zur Anwendung kommen und erfolgt auf der Basis von den in diesem Bericht aufgeführten Anlagetechniken. Es wird davon ausgegangen, dass der Betrieb der Anlage wärmegeführt erfolgt und die Leistung während der Heizsaison dem Wärmebedarf folgt. Ausserhalb der Heizsaison kann die Anlage gegebenenfalls mit einem stromfreundlicheren Tuning betrieben werden und für das Vorhalten von Regelleistung bereitgestellt werden. Im Gasbetrieb erbringt die Anlage somit eine elektrische Leistung von knapp 75 MW. Bei einem thermischen Wirkungsgrad von 35% wird zudem eine Heizleistung von etwa 52.7 MW freigesetzt. Die jährliche Betriebszeit mit Wärmenutzung wird auf 6'000 Stunden festgelegt. Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten aufzuzeigen, wird die auf die untersuchten Komponenten bezogene Amortisationszeit basierend auf den angenommenen Erlösen (Verkaufspreis an Energiebezüger) dargestellt. Die Erlöse aus dem Verkauf der Energie werden für Elektrizität mit 8 Rp/kWh und für Wärme mit 5 Rp/kWh angenommen, bei einem Gaspreis von 4.8 Rp/kWh und einem Heizölpreis von 7.3 Rp/kWh. Der angenommene Strompreis ist bewusst eher hoch gewählt, mit der Annahme dass ein lokaler Anbieter für elektrische Energie einen höheren Gewinn erzielen kann als dies auf dem freien Markt möglich ist. Ziel dieses Beispiels ist es, aufzuzeigen dass es selbst mit Gas als Brennstoff nur unter bestimmten Umständen möglich ist einen wirtschaftlich erfolgreichen Betrieb mit einer verbrennungsbasierten Technologie darszustellen. Basierend darauf soll anschliessend gezeigt werden, wie es mithilfe der breiten Brennstoffakzeptanz von Zweitaktmaschinen trotzdem möglich ist klimafreundlich und wirtschaftlich Strom resp. Wärme zu produzieren.

Die Investitionskosten einer solchen Anlage basieren auf Erfahrungswerten und ergeben sich aus den in diesem Bericht beschriebenen Komponenten der Anlage. Über einen Betrachtungsraum von 10 Jahren werden mit einem Zinssatz von 4% die Jahreskosten ermittelt. Die Betriebskosten beinhalten jedoch keine Lohnkosten oder Versicherungen etc.

Für die wirtschaftliche Betrachtung dieser Anwendung werden folgende Erlöse miteinbezogen:

- Verkauf von Fernwärme
- Verkauf von Elektrizität

Ausser Acht gelassen wurden dabei:

- Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung (Reserven)
- Verkauf von positiver und negativer Regelenergie (Mehr- und Minderproduktion)

Da die Gesamtfeuerungswärmeleistung über 20 MW liegt, ist die Teilnahme am Emissionshandelssystem (EHS) zwingend und die CO<sub>2</sub>-Abgabe von 96CHF/t auf die fossilen Brennstoffe entfällt. Dies wird in der Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Beispiel REFUNA bei den Varianten für fossile Brennstoffe

entsprechend berücksichtigt. Für die Berechnung der Kosten der Emissionsrechte wird ein Preis von 33 CHF je Emissionsrecht angenommen.

<b>Investitionskosten WKK-Anlage</b>		
Investitionskosten	42'232'692	CHF
Zinssatz	4%	
Jahreskosten Kapital	5'206'909	CHF/a
<b>Betriebskosten</b>		
Preis Heizöl	7.3	Rp/kWh*
Preis Erdgas	4.8	Rp/kWh*
Brennstoffkosten pro Jahr	30'776'643	CHF/a <sup>2</sup>
Instandhaltungskosten pro Jahr	854'215	CHF/a
<b>Energieumsatz</b>		
Eingesetzte chemische Energie	904'327'199	kWh/a
Stromerzeugung	449'734'680	kWh/a
Wärmeerzeugung	170'000'000	kWh/a
<b>Erlöse</b>		
Stromvergütung	8	Rp/kWh
Wärmevergütung	5	Rp/kWh
Stromertrag pro Jahr	35'978'774	CHF/a
Wärmeertrag pro Jahr	8'500'000	CHF/a
Jährlicher Überschuss ohne Kapitalkosten	12'847'917	CHF/a
Jährlicher Überschuss inkl. Kapitalkosten	7'641'008	CHF/a
Amortisationszeit ohne Kapitalkosten	3	Jahre
Amortisationszeit mit Kapitalkosten	6	Jahre
<b>Gestehungskosten</b>		
Elektrizität	4.1	Rp/kWh

Tabelle 7: Kostenübersicht der ECSES-Anlage im Fallbeispiel REFUNA

\*Preis bezogen auf unteren Heizwert

Die Investitionskosten sind sehr niedrig weil, wie schon erwähnt, sie nur für die Energieumwandlungs-Technologie berechnet wurden. Gebäude, Fundament, Installationsarbeiten, Trainings etc. sind nicht mit eingerechnet. Bei den Betriebskosten fällt auf, dass die Instandhaltungskosten gerade einmal ein Prozent der Brennstoffkosten ausmachen. Dies ist sehr interessant, da gerade letztere je nach Brennstoff stark variieren können.

Mit dem Erlös aus dem hohen Strompreis und dem zusätzlichen Erlös aus dem Verkauf der Wärme, lässt sich in diesem Beispiel mit der ECSES-Anlage genug Gewinn erwirtschaften um die Investitionskosten innerhalb von 10 Jahren zu amortisieren. Sehr ähnlich sieht es auch für GUD und Viertaktmotoren aus. Hinzu kommen natürlich noch weitere Investitionskosten sowie Löhne, Steuern etc. Am freien Strommarkt hat man mit also bei den angenommen Preisen für Gas und Heizöl keine Aussicht auf Gewinn. Deshalb wird im folgenden Kapitel der Einfluss des Brennstoffpreises genauer untersucht.

<sup>2</sup> inklusive Emissionshandel, (Stand am 1. Januar 2020):

1. Rückerstattung 96 CHF/t
2. Subtraktion der Gutschrift an Emissionsrechten [34]: 62.3 Tonnen CO<sub>2</sub> pro TJ abgegebener Wärme
3. Einkauf der restlichen Emissionsrechte: 33 CHF/t

### 8.3 Wirtschaftliche Effekte potenzieller Brennstoffe

Wie in Kapitel 8.2 beschrieben, lässt sich mit den angenommenen Brennstoffpreisen in Kombination mit den eingesetzten Strompreisen eine Anlage nur unter speziellen Bedingungen wirtschaftlich betreiben – unabhängig der eingesetzten Technologie. Der Brennstoffpreis ist die Stellschraube im System mit der grössten Wirkung. Und der Zweitaktmotor wird historisch bedingt seit Jahrzehnten auf eine breite Brennstoffakzeptanz hin optimiert. Auch heute wird weiterhin intensiv daran gearbeitet, dieses Spektrum zu erweitern [35]. Diese Tatsache könnte es erlauben auf Basis des Zweitaktomors eine wirtschaftlich und ökologisch attraktivere Anlage aufzustellen. Anhand von drei Szenarien wird aufgezeigt wie dies möglich wäre:

- Szenario 1: Erneuerbarer Betrieb mit 100% Tierfett (in der Schweiz begrenzte Verfügbarkeit)
- Szenario 2: Teil-erneuerbarer Betrieb mit 75% Lösungsmittel 25% Erdgas
- Szenario 3: Teil-erneuerbarer Betrieb mit 100% Altölen (Hydrauliköle etc.)

Brennstoffe auf Basis tierischer Fette wurden schon auf einem Versuchsmotor sowie in einem Feldversuch erfolgreich getestet. Mit Lösungsmitteln als Brennstoff gibt es für die Zweitakt WKK-Anlage derzeit noch keine konkreten Erfahrungswerte. Basierend auf den Untersuchungen mit Ethanol kann jedoch davon ausgegangen werden dass der Einsatz eines solchen Brennstoffs – mit dem passenden Brennstoffsysteams – möglich sein müsste. Es bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen und der Entwicklungsschritte bis eine Serienanwendung möglich ist. Ein Prototyp eines solchen Systems wurde bei WinGD entwickelt und erfolgreich getestet [35]. Es weist die nötigen Spezifikationen auf, welche für eine entsprechende Anwendung nötig wären.

Altöle könnten interessant sein, da sie aufgrund ihrer Eigenschaften mit bestehenden Komponenten genutzt werden könnten. Es wären jedoch Versuche an einem Testmotor nötig um den Einfluss auf die Emissionen zu verstehen. Je nach Zusammensetzung könnten sich diese verändern.

Tabelle 8 zeigt die wichtigsten finanziellen Eckdaten für die drei verschiedene Brennstoffe.

Brennstoff	Tierfett	Gas + Lösungsmittel	Altöl	Einheit
Brennstoffpreis	4.50	4.8+0.45	0.83	Rp/kWhHu
jährlicher Überschuss inkl. Kapitalkosten:	4'149'513	30'053'142	37'341'726	CHF/a
Gestehungskosten Elektrizität	4.48	1.60	0.79	Rp/kWh

Tabelle 8: Finanzielle Gegenüberstellung alternativer Brennstoffe

Mit den Tierfetten könnte man einen CO<sub>2</sub>-freundlichen Betrieb erreichen und würde jährlich jedoch nur einen kleinen Überschuss erzielen. Dieses Szenario ist heute schon denkbar und könnte mit entsprechenden Verträgen zur Abnahme der Jahresmengen umgesetzt werden. Interessant wird es mit der Beimischung von gebrauchten Lösungsmitteln. Hierbei reicht, je nach Qualität und Preis des Brennstoffs schon ein kleiner Anteil des Brennstoffs um wirtschaftlichen Gewinn zu erzielen und sobald man in die Bereiche der negativen Preise kommt, wird es dann sehr interessant. Und bei einem Betrieb mit Altölen, ein Szenario das heute schon durchaus denkbar wäre, würden die Gewinne schon gut reichen um am freien Strommarkt erfolgreich zu arbeiten. Eine solche Anlage wäre nicht nur wirtschaftlich interessant, sie könnte auch zur sauberen Entsorgung von flüssigen Abfallstoffen genutzt werden und könnte damit auch einen ökologischen Beitrag leisten. Die Tabelle im Anhang auf Seite 50 gibt einen Überblick der untersuchten und der vorstellbaren Brennstoffe.

## 9 Fazit

Die hier vorliegende Untersuchung zeigt, dass vom thermodynamischen Standpunkt her betrachtet eine auf einem Zweitaktmotor basierende WKK-Anlage sehr konkurrenzfähig ist und darüber hinaus seine wesentlichen Vorteile gegenüber herkömmlichen, gefeuerten Systemen ausspielen kann.

Die etwas teurere Konstruktion eines robusten und flexiblen Aggregats, lässt sich innerhalb weniger Jahre wieder durch die tiefen Wartungskosten und die hohe Effizienz kompensieren. Der sich über einen weiten Lastbereich nur wenig ändernde Wirkungsgrad ist erwähnenswert, da dies im Vergleich zu anderen Technologien ein erhebliche Flexibilität anbietet. Berücksichtigt man diese Eigenschaft, lassen sich sogar eventuelle Änderungen der Randbedingungen während des Baus des Kraftwerks kompensieren und reduziert somit das Risiko der Investoren.

Neben fossilen Brennstoffen lassen sich bei dieser Anwendung schon heute einige erneuerbare Brennstoffe verwenden. Darüber hinaus gibt es auch eine Vielzahl potentieller Brennstoffe die jedoch einen gewissen Untersuchungsaufwand voraussetzen. Aber die Brennstoffflexibilität eines solchen Motors ist einzigartig und erlaubt es – bislang jedoch erst im Prototypenstadium – Brennstoffe mit Heizwerten unter 20MJ/Liter nutzen. Die Möglichkeit, ein solches Kraftwerk mit einem Mix aus flüssigem und gasförmigem Brennstoff, mit teils milderer Qualität, zu betreiben unterstreicht dieses Potential deutlich.

Erste Abfallprodukte können mit der ECSES-Anlage schon heute entsorgt und mit entsprechend hohem Wirkungsgrad in Energie umgewandelt werden. Die Einhaltung der gängigen Emissionsvorschriften für stationäre Anwendungen sind in jedem Betriebspunkt sowohl in der Schweiz, als auch international gewährleistet und machen die ECSES-Anlage somit zu einer ökologischen Alternative zur Energiegewinnung mit fossilen oder biogenen Brennstoffen.

## 10 Abkürzungen

AKW	Atomkraftwerk
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BMEP	«Break Mean Effective Pressure» (Effektiver Mitteldruck)
CAC	«Charge Air Cooler» (Ladeluftkühler)
DME	Dimethylesther
EnG	Energiegesetz
ES2050	Energie Strategie 2050
GUD	Kombikraftwerk (Gas und Dampf)
JAZ	Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe)
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
LRV	Air Quality Directive
ORC	«Organic Rankine Cycle»
RME	Rapsmethylesther
SCR	Selective Catalytic Reduction
TC	Turbolader
TMF	Tiermehlfabrik
VOC	Volatile Organic Compounds
WHR	«Waste Heat Recovery»-System
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung

## 11 Referenzen

- [1]. "Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekopplung (WKK) in der Schweiz", Urs Kaufmann, Dr. Eicher+Pauli AG, BFE, September 2018
- [2]. "Combined Heat and Power Market, Update 2019 - Global Market Size, Segmentation, Regulations, and Key Country Analysis to 2025", LONDON, March 4, 2019 , PRNewswire
- [3]. "Ausbau von Wärmenetzen vs. energetische Sanierung? – Umgang mit konkurrierenden Strategien zur Umsetzung der „Wärmewende“ auf kommunaler Ebene", Susanne Schubert, 12. April 2016 , Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
- [4]. "Projekt Thermische Vernetzung" - Konzeptvorschlag, Hochschule Luzern, Marie-Theres Caratsch, Diego Hangartner, Joachim Ködel, Joseph Sfeir, Prof. Matthias Sulzer, BFE, März 2015
- [5]. "Fallbeispiele – Thermische Netze", Energie Schweiz, Zusammenfassung 22.02.2018
- [6]. [Luftreinhalte-Verordnung \(LRV\)](#)
- [7]. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Luft/taluft.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft.pdf)
- [8]. [VDMA, Engines and systems, exhaust emission legislations, diesel and gas engines, Januar 2017, mus.vdma.org/emissions](http://mus.vdma.org/emissions)
- [9]. [https://www.wingd.com/en/documents/technical-information-notes/wingd\\_tin018\\_launching-x-df2-0-with-icer](https://www.wingd.com/en/documents/technical-information-notes/wingd_tin018_launching-x-df2-0-with-icer)
- [10]. "Turbines vs reciprocating engines", Issue 11 and Volume 120, Ralf Grosshauser, 17.11.2016
- [11]. WinGD-internes Messprotokoll W6X62DF SK2080
- [12]. "Abgasreinigung eines Grossdieselmotors – Technologiestudie Partikelfilter", TBF + Partner AG, Planer und Ingenieure. 25.10.2009
- [13]. "WinGD low-speed engines 2019", Copyright 2019 Winterthur Gas and Diesel LtD.
- [14]. "Nachhaltige Kraftstoffe in der Seeschifffahrt", Becker, M., Sonderprojekte ATZ/MTZ **24**, 58 (2019)
- [15]. "The FALCON Project", [www.falcon-biorefinery.eu](http://www.falcon-biorefinery.eu)
- [16]. "The IDEALFUEL Project", <https://idealfuel.eu/>
- [17]. <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/energieversorgung/biomasse/alternative-kraftstoffe/ueberblick.html>
- [18]. "[Palmöl](#)", WWF Schweiz
- [19]. "Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping", European Parliament, 2018
- [20]. "Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff", Katja Kraus, Guido Niklas, Matthias Trappe: Texte 79/99. Umweltbundesamt, Berlin 1999, ISSN 0722-186X
- [21]. "Sonderabfallstatistik 2017", BAFU, R423-1813, Dezember 2018
- [22]. "Systems for increased fuel flexibility" Hercules-2, WP1, Presentation, Andreas Schmid, Kai Portin, October 2015,
- [23]. „Stickstoffbasierte Kraftstoffe: eine "Power-to-Fuel-to-Power“ – Analyse“, Alon Grinberg Dana, Oren Elishav, Andre Bardow, Gennady E. Shterund, Gideon S. Grader, Alternative Kraftstoffe, Deutsche Ausgabe: DOI:10.1002/ange.201510618
- [24]. <https://www.omv.com/de/blog/reoil-aus-kunststoff-wieder-oel-gewinnen>
- [25]. "Planungshandbuch für Fernwärme, Schlussbericht 2017", EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, ISBN 3-90870505-30-4, Version 1.0 vom 25. April 2017
- [26]. <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9ha>

- [27]. <https://www.innio.com/en/products/jenbacher/920-flextra>
- [28]. <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-800.html>
- [29]. "Gaskombikraftwerke versus Wärmekraftkopplungsanlagen -Vergleich zweier kurzfristig realisierbarer Optionen für die Stromproduktion in der Schweiz", Jochen Ganz, Walter Weiler, Stefan Stahl, ElectroSuisse Bulletin 04/2014
- [30]. "Stationäres Betriebsverhalten", Bauer A., Marmilic R., Rofka S. (2019). In: Lechner C., Seume J. (eds) Stationäre Gasturbinen. VDI-Buch. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [31]. "Unlocking optimum CHP performance in future power systems", Frank Kettig, In Detail - Wärtsilä Technical Journal, 25.04.2016
- [32]. "Flexibility Solutions for High-Renewable Energy Systems", BloombergNEF, November 2019
- [33]. "Kraft-Wärme-Kopplung", Gunter Schaumann, Karl W. Schmitz, Springer Verlag, VDI Buch, ISBN 978-3-642-01425-3, 4. Vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage, 2010
- [34]. [https://www.bundespublikationen.admin.ch/cshop\\_mimes\\_bbl/14/1402EC7524F81EDAABEE1DD09029F1AD.PDF](https://www.bundespublikationen.admin.ch/cshop_mimes_bbl/14/1402EC7524F81EDAABEE1DD09029F1AD.PDF), S. 102 Art. 46 Abs. 1 und 46c Abs. 3: 1.2
- [35]. "Fuel Flexible Injection System – How to Handle a Fuel Spectrum from Diesel-Like Fuels to Alcohols", A. Schmid, T. Yildirim, N. Yamada, Paper no. 404, CIMAC Congress 2019, Vancouver, Canada

## 12 Anhang

### Brennstoffübersicht

Tabelle 9: Übersicht möglicher Brennstoffe für einen 30MW Motor.

	Brennstoffart	Verfügbarkeit in der Schweiz	Bereitschaft für die Anwendung in einem Zweitaktmotor (TRL)	Anmerkungen
Fossil	Erdgas	gegeben	heutiger Standard (9)	
	Heizöl	gegeben	heutiger Standard (9)	
	Raffinerieabfallprodukte	Schweröl bzw. zukünftige Nebenprodukte sind jedoch fossil	heutiger Standard (9)	
Bio 1.0	Biogas	Nur als Beimisch-Komponente da nur kleine dezentrale Anlagen im Feld	heutiger Standard (9)	
	Deponiegas	Nicht mehr verfügbar, Deponien erschöpft	nicht spezifisch getestet, aber standard für 4-Takt (6)	
	Holzgas	Nur als Beimisch-Komponente da nur kleine dezentrale Anlagen im Feld	nicht spezifisch getestet, aber standard für 4-Takt (6)	Bisher keine grösseren Anlagen (> 2MW) im Feld
	Klärgas	Als Beimisch-Komponente	nicht spezifisch getestet, aber standard für 4-Takt (6)	ARA's dezentral / relativ klein
	RME	gegeben	nicht spezifisch getestet, aber standard für 4-Takt (6)	CH und Import
	Biodiesel	gegeben	heutiger Standard (9)	CH und Import
	Pflanzenöle	begrenzt	nicht spezifisch getestet, aber standard für 4-Takt (6)	Nicht empfohlen da Konkurrenz zu Nahrungsmitteln
Bio 2.0	Alt-Schmieröle	Gegeben, Konkurrenz mit Zement-industrie	nicht spezifisch getestet, müsste genauer untersucht werden (4)	> 50'000 t/a verkauft (Annahme ca. 80% werden als Gebrauchöle entsorgt)
	Lösungsmittel	Konkurrenz mit Zementindustrie	nicht spezifisch getestet, aber keine Probleme erwartet (5)	Verfahren ähnlich wie im HERCULES-2 Projekt, zurzeit im Prototypenstadium
	Ethanol	Keine Grossproduktion vorhanden (ggf. Import)	An Versuchsmotor getestet (6)	HERCULES-2 Projekt, zurzeit im Prototypenstadium

Methanol	Keine Grossproduktion vorhanden (ggf. Import)	nicht spezifisch getestet, aber keine Probleme erwartet (5)	HERCULES-2 Projekt, zurzeit im Prototypenstadium
Re Oil «Synthetisches Rohöl», siehe Kapitel 3.4	Zurzeit nicht vorhanden	Müsste getestet werden (3)	Herstellung des Brennstoffs im Entwicklungsstadium
Tier Fett	ca. 18'000 t/a	Im Feldversuch getestet (7)	
Lignin basierender, flüssiger Brennstoff	Zurzeit nicht vorhanden	Wird zurzeit entwickelt (3)	Entwicklungsstadium: z.B. Idealfuel
Wasserstoff	Vision	Motoranwendung nicht getestet (2)	Würde wahrscheinlich nur beigemischt
VOC	Schweizweit grosse Gesamtmengen / jedoch verteilte Quellen in Industrie und Gewerbe	X-DF getestet, aber nur beigemischt (7)	Nur beigemischt

## Vergleich Sekundär- zu Tertiärregelung

In der nachfolgenden Tabelle werden die für industriellen Anbieter von SDL relevanten Unterschiede zwischen Sekundär- und Tertiärregelung aufgezeigt.

	SEKUNDÄRREGELUNG	TERTIÄRREGELUNG
Aktivierungsmodus	Automatisch	Manuell
Vollaktivierungszeit	Leistungsänderung von 0.5% der Nominalleistung pro Sekunde	Schnelle ( $\pm$ ) Energielieferung: max. 15 Minuten Langsame (-) Energielieferung: 20 Minuten auf Fahrplanintervall
Deaktivierungszeit	Leistungsänderung von 0.5% der Nominalleistung pro Sekunde	Auf Fahrplanintervall
Sollsignalverlauf	Kontinuierlich	Stufenweise gemäss Angebot
Ausschreibungsprodukte	1 Produkt 'Woche', asymmetrisch (ab KW24 2018) symmetrisch (bis KW23 2018)	6 Produkte 'Tag, 4h-Blöcke' und 1 Produkt 'Woche', je asymmetrisch
Ausschreibungsmenge	Ca. $\pm$ 400 MW	Ca. + 400MW / - 250MW
Angebotsgrösse und Struktur	Min. $\pm$ 5 MW Erhöhung jeweils inkrementell $\pm$ 1 MW Nicht teilbar, Stufenangebote sind erlaubt	Min. + 5 MW / - 5 MW Erhöhung jeweils inkrementell $\pm$ 1 MW Nicht teilbar, Stufenangebote sind erlaubt
Entschädigung Leistung	Angebotener Leistungspreis (pay as bid)	Angebotener Leistungspreis (pay as bid)
Entschädigung Energie	SwissIX +20% (pos. RL; mind. Wochenbase), -20% (neg. RL; max. Wochenbase)	Gemäss Angebot SDV