

---

# **Analyse verschiedener Wärme Verschaltungen von Motor- BHKW im Hinblick auf eine optimale Primärenergienutzung**

Philipp Niegemann, M.Sc.

IVG

Institut für Verbrennung und Gasdynamik –

Reaktive Fluide

Universität Duisburg-Essen

Lotharstraße 1

MA 362

47057 Duisburg

Tel.:+49-203 379-2789

Fax.:+49-203 379-8159

<http://www.uni-due.de/ivg/rf/>

[philipp.niegemann@uni-due.de](mailto:philipp.niegemann@uni-due.de)

---

# 1 Kurzfassung

In der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung aus Anlagen kleiner und mittlerer Leistung stehen Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Gasmotoren im Wettbewerb mit Gas- und Dampfturbinenanlagen sowie Kombikraftwerken. Die durchgeführten Untersuchungen belegen allgemein die Vorteile von BHKW mit Gasmotoren hinsichtlich Wirkungsgrad, Schnellstartverfügbarkeit und Lastwechselverhalten gegenüber alternativen Anlagenkonzepten. Detailliert wurde die Optimierung der Wärmeausbeute unter Variation der Außenbedingungen untersucht.

Für die Untersuchung der Anlagenverschaltung wurde das windowsbasierte Programm Epsilon Professionel® für wärmetechnische und verfahrenstechnische Simulation von thermodynamischen Kreisprozessen eingesetzt. Analysiert wurden zwei Anlagenkonzepte mit 3 parallelgeschalteten ca. 10 MW<sub>el</sub> Gasmotoreinheiten, deren Abwärme aus Motorkühlung sowie Abgasstrom in ein Fernwärmenetz eingekoppelt wird. In einer Variante ist die Erhöhung der Nutzwärmeleistung über gasgefeuerte Kanalbrenner im Abgasstrom der Motoren vorgesehen, in der anderen Variante wird im Fernwärmekreislauf ein gasgefeuerter Heißwasserkessel als Zusatzwärmequelle eingefügt. Die zweite Variante bietet den Vorteil einer Redundanz der Fernwärmebereitstellung auch im Revisionsfall der Gasmotoren.

Die Untersuchung des Teillastverhaltens der Anlagen ergab, dass die Abschaltung einzelner Motoren hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades der Gesamtanlage gegenüber Leistungsreduzierung aller Motoren im Parallelbetrieb vorteilhaft ist. Obwohl vom Hersteller zugelassen, ist der Teillastdauerbetrieb einzelner Motoren mit stark reduzierter Last von minimal 30 % auf Grund der Wirkungsgradeinbuße nicht empfehlenswert. Aus energetischer Sicht sollte die Leistungsabsenkung einen Wert von 75 % Last je Motor nicht unterschreiten. Die analysierten Betriebsdaten in Abhängigkeit von den Umgebungstemperaturen zeigten nur geringe Empfindlichkeit der Anlage bezüglich Wirkungsgrad und Brennstoffausnutzung. Die Eignung der Anlagenkonzepte für den Einsatz im Regelenergiemarkt und für die Inanspruchnahme der Förderung nach dem aktuellen KWKG-Gesetz konnte nachgewiesen werden. Dies ist Beleg für die Betriebsflexibilität und die Hocheffizienz des Anlagenkonzeptes für die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung.

## 2 Einleitung

Die politisch gewollte Energiewende in Deutschland führt zu einem wachsenden Ausbau von Anlagen für den Einsatz sogenannter erneuerbarer Energien. Kennzeichnend für die dabei dominierenden Windparks und PV-Anlagen ist deren unzureichend planbare Zeitverfügbarkeit. Gleichzeitig haben sie Vorrang bei der Einspeisung und Übertragung ihres Stroms in das Verteilernetz. Daraus können vorübergehende Leistungsengpässe, aber auch Netzüberlastungen wegen eines Überangebotes von Strom entstehen, die für eine stabile Stromversorgung möglichst kurzfristig ausgeglichen werden müssen, um einerseits Verbraucherabschaltungen zu vermeiden und andererseits abschaltbare Regelleistung zur Verfügung zu haben. Es bietet sich an, dafür besonders schnell startende, dezentrale Kraftwerksanlagen zur Verfügung zu haben.

Unter dem Gesichtspunkt einer effizienten Primärenergienutzung sind dabei Anlagen zu bevorzugen, die gleichzeitig Strom und Wärme liefern. Wegen der begrenzten Reichweite der Übertragung von Wärme vom Kraftwerk zum Verbraucher, wenn diese energetisch effizient sein soll, sind verbrauchsnahe Standorte notwendig. Diese Bedingungen erfüllen dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die ab einer Mindestprimärenergieausnutzung für den erzeugten Strom abhängig vom Erzeugungstyp einen gesetzlich geregelten Preisbonus nach dem sogenannten KWK-Gesetz erhalten. Dieser Zusatzerlös soll auch die Kostennachteile erhöhter spezifischer Investitionskosten für kleine und mittelgroße Anlagen gegenüber Großkraftwerken mit ausschließlicher Stromerzeugung zumindest teilweise ausgleichen.

Der Untersuchung lag die Aufgabe zugrunde, Lösungsvorschläge für gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung hinsichtlich der gestellten Anforderungen an eine effektive und umweltfreundliche Energieversorgung durch ein konkretes Anlagenkonzept zu unterbreiten. Dafür wurde als Ausführungsbeispiel eine KWK-Anlage mit Gasmotoren in modularer Bauweise mit einem nachgeschalteten Fernwärmenetz gewählt. Die Erfahrungswerte aus dem Einsatz marktgängiger Komponenten waren zu berücksichtigen. Es sollte eine möglichst flexible Nutzwärmedarbietung im Verbund mit der Stromerzeugung erreicht werden. Wünschenswert erschien eine Redundanz der Wärmebereitstellung auch bei Ausfall der Stromerzeugung.

## 3 Die Stellung der BHKW in der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung

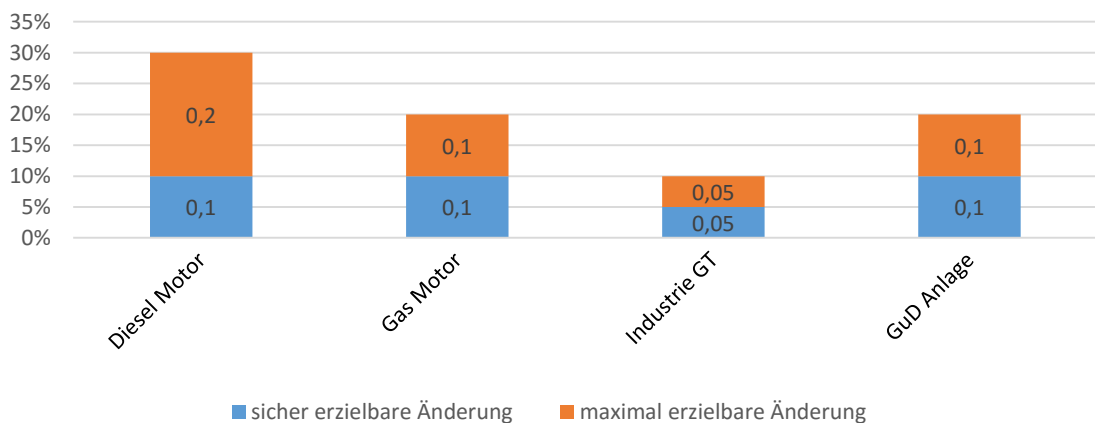
### 3.1 Merkmale der BHKW und Gegenüberstellung mit alternativen technischen Konzepten

In der dezentralen Strom und Wärmeversorgung stehen die BHKW-Anlagen mit Gasmotoren im Wettbewerb mit Gas bzw. Gas-Dampf-Kombi Kraftwerken bis etwa 50 MW elektrischer Leistung. Das entspräche 5 Einheiten des hier betrachteten Motorgenerator-satzes. Charakteristisch für den Einsatz von Motoren sind dabei das Schnellstartverhalten, die erreichbare Laständerungsgeschwindigkeit, der höhere elektrische Wirkungsgrad sowie die höhere Stromausbeute im Verhältnis zur Nutzwärmeabgabe (Stromkennziffer) im Vergleich mit Turbinenanlagen.

Die Vorzüge des schnellen Leistungsanstiegs der BHKW mit Gasmotoren beim Anlagenstart veranschaulicht die Übersicht der Tabelle 1. Diese zeigt detailliert das Startverhalten von Motoren mit flüssigen und gasförmigen Brennstoffen in der Gegenüberstellung mit Gasturbinen, Gas- und Dampfturbinen-Anlagen und Dampfturbinenkraftwerken [1]. Abbildung 1: Maximale Laständerung innerhalb von 5 s Abbildung 1 verdeutlicht die Überlegenheit der Motoren hinsichtlich zeitlichem Laständerungsverhalten und damit Betriebsflexibilität gegenüber allen anderen Anlagentypen.

**Tabelle 1: Start von 0-100 % Last [2]**

Diesel Motoren	1 – 5 min
Gas Motoren	5 – 10 min
Industrie Gasturbinen	10 – 20 min
Gas-Dampf-Kraftwerke	30 – 60 min



**Abbildung 1: Maximale Laständerung innerhalb von 5 s [3]**

Die veränderten Bedingungen in den Stromverteilernetzen mit zunehmender Anzahl von Stromerzeugungsanlagen und zeitlich stark schwankender Stromeinspeisung bis hin zu deren Ausfall erfordern flexible Ausgleichsmechanismen für bedarfsgerechte Abnehmerversorgung. Die hohe zeitliche Flexibilität der hier untersuchten BHKWs unterstreicht deren besondere Eignung für die Bereitstellung von positiver und negativer Regelenergie, für die der Strommarkt Zusatz Erlöse bietet, sofern die Anlagen in den Kapazitätspool für Regelenergie eingebunden werden. Die Regelenergievermarktung erfolgt dabei über die Strombörse im Rahmen sogenannter „Virtueller Kraftwerke“, für die Leistungspreise für positive und negative Minutenreserve gezahlt werden [4]. Ersichtlich kommt hier die schnelle Leistungsbereitstellung von BHKWs mit Gasmotor innerhalb von Minuten als besonderer Vorteil zum Tragen.

BHKWs mit mehreren parallel geschalteten Motoren erreichen im Vergleich zu einer Gasturbinenanlage im Leistungsbereich bis 60 MW deutlich höhere Wirkungsgrade, was aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ersichtlich ist.

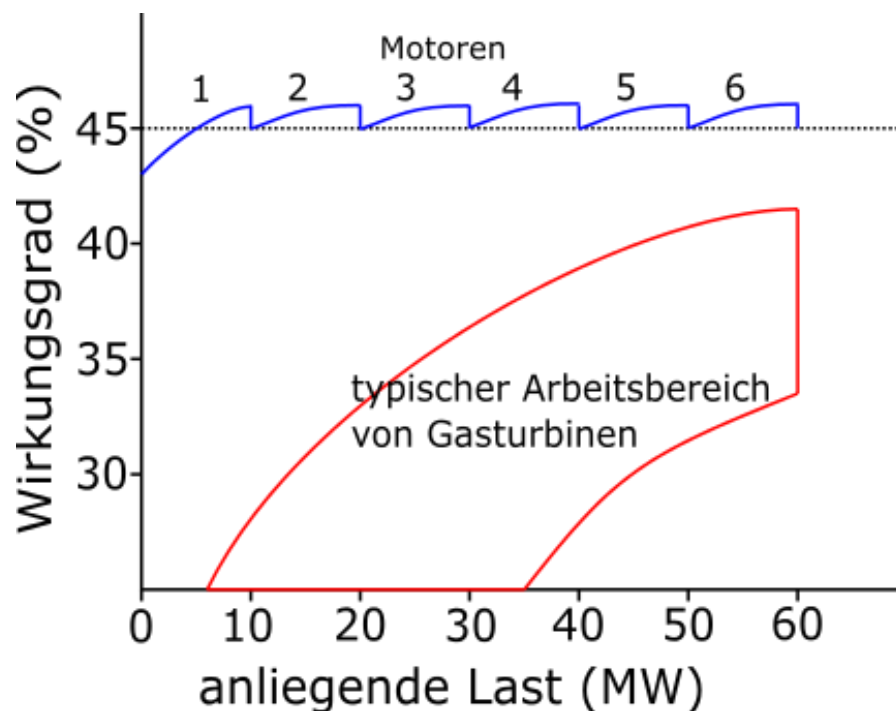


Abbildung 2: Vergleich von Wirkungsgraden in Abhängigkeit von abgefragter Leistung [2]

## 4 Anlagenkonzepte für das BHKW

Die untersuchten Anlagen bestehen aus Gasmotor-, Generatorblock mit Gaszuleitung, Kühlsystem für Motorgehäuse und Schmieröl, Abgasabführung zu einem Hochtempera-

turwärmetauscher und Niedertemperaturabfuhr über einen Radiator auf dem Gebäudedach. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Fokussierung auf die Wärmenutzung, wurde das Modell in der Darstellung des Anlagenschaubildes als Motor mit nur einem Wasserzulauf und Wasserrücklauf sowie nur einem Wärmetauscher dargestellt. In der Simulationsrechnung wurde das volle detaillierte Modell inklusive Öl-Kühler und 2-fachem Wasserkreislauf berücksichtigt. Der Motor-, Generatorsatz sind im betrachteten Anlagenkonzept 3fach vorhanden, in der berechneten Ausführung leistet jede von ihnen 10 MW, in Summe 30 MW. Die nutzbare Abwärme der Gasmotor-Generatorblöcke wird über getrennte Wärmetauscher für das Motorgehäuse und den Schmierölkühlkreislauf sowie die Abgaswärmeabfuhr in den Fernwärmekreislauf eingekoppelt. Der Fernwärmekreislauf besitzt eine Umwälzpumpe und einen Notkühler, der bei Störungen der Fernwärmeabnahme die aus dem Betrieb der Motoren anfallende Nutzwärme an die Atmosphäre abführt.

Der Fernwärmekreislauf ist in zwei Varianten ausgeführt, die getrennt vergleichend untersucht wurden. In der Variante 1 erfolgt die mögliche Erhöhung der Fernwärmeleistung im Bedarfsfall durch gasgefeuerte Kanalbrenner, die jeweils im Abgasstrom der Motoren installiert sind (Abbildung 3: BHKW-Anlage mit Kanalbrennern).

In der Variante 2 ist im Fernwärmekreislauf ein gasgefeuerter Wasserrohrkessel zusätzlich installiert, über den im Bedarfsfall die Fernwärmeleistung erhöht werden kann (Abbildung 4: BHKW-Anlage mit Zusatzkessel). Dieses Konzept bietet den Vorteil einer redundanten Fernwärmeerzeugung bei Ausfall der Gasmotoren aus den Stromerzeugungseinheiten.

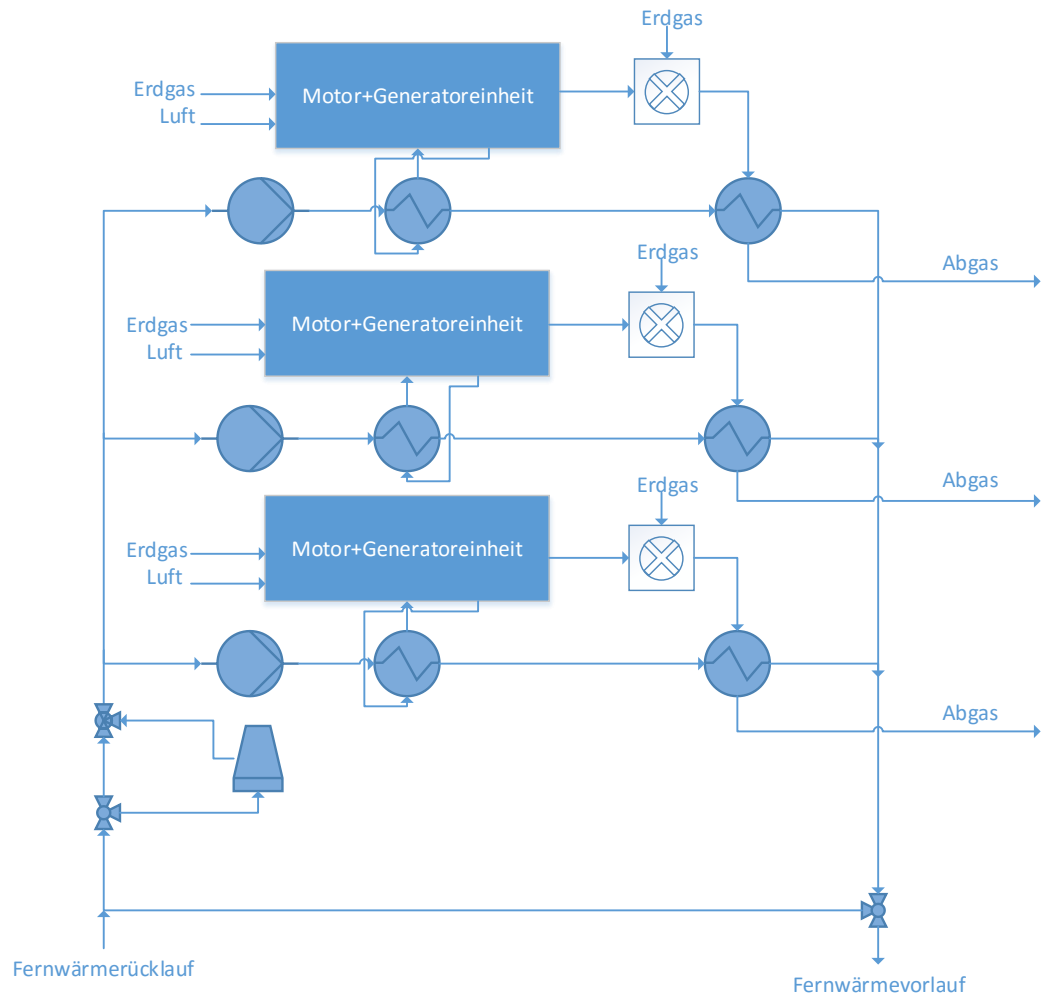


Abbildung 3: BHKW-Anlage mit Kanalbrennern

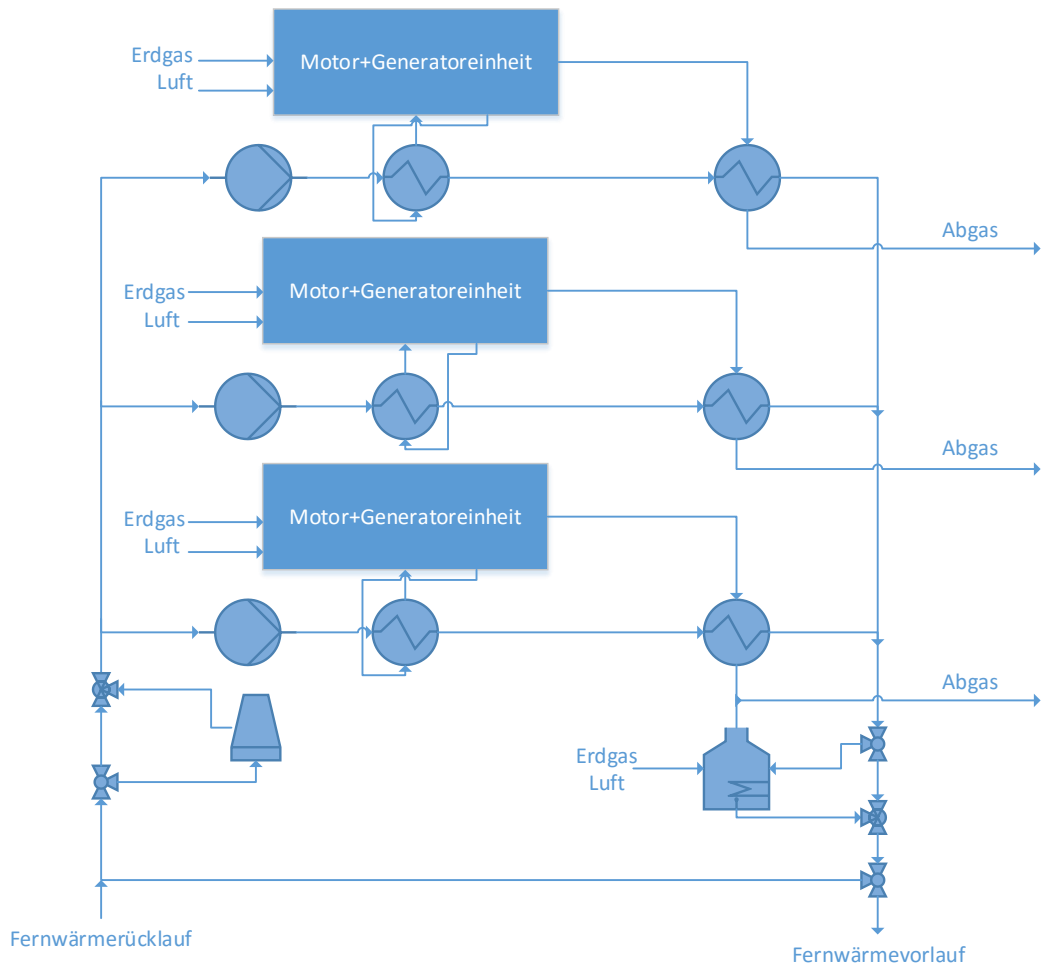


Abbildung 4: BHKW-Anlage mit Zusatzkessel

Die Untersuchung wurde mit dem Simulationsprogramm Epsilon Professional® durchgeführt und verwendete den Motor-Generatorblock 20V34SG von Wärsilä als Referenz für diese Leistungsklasse [5] [6]. Charakterisiert wird der Motor-Generatorsatz durch folgende Leistungswerte.

**Tabelle 2: Gas Engines 34SG Power Plants Product Catalogue 2012 Wärsilä**

Technische Daten	Einheit	20V34SG
Leistung, elektrisch	kW	9730
Nutzwärmeleistung	kW	7779
Elektrischer Wirkungsgrad	%	46,3
Nutzungsgradges.	%	83,3
Elektische Anlagenleistung	kW	29190
Anlagenwärmeleistung	kW	23337



Für die Vergleichsbetrachtung bei Einsatz von Gasturbinen wurde eine Anlage gleicher Leistung bestehend aus zwei Turbosätzen vom Typ Titan 130 mit einer elektrischen Leistung von je 15 MW zugrunde gelegt [7]. Die technischen Daten des Anlagenkonzeptes mit Gasturbinen sind der Tabelle 3 zu entnehmen und beruhen auf den Angaben des Herstellers.

**Tabelle 3: Anlagendaten der Gasturbine Titan 130 SOLAR**

Technische Daten	Einheit	Titan 130
Leistung, elektrisch	kW	14375
Nutzwärmeleistung	kW	21000
Eklektischer Wirkungsgrad	%	35,2
Nutzungsgrad ges.	%	84,2
Elektrische Anlagenleistung	kW	30000
Anlagenwärmeleistung	kW	42000

Nach Angaben des Gasturbinen Herstellers ist eine Leistungsabsenkung einer Maschine auf bis zu 50 % möglich. Dabei erreicht die Anlage einen elektrischen Wirkungsgrad von 26,08 %. Der Gesamtnutzungsgrad bleibt jedoch konstant, da die Lastabsenkung zu höhere Abgastemperaturen führt. Die Gegenüberstellung mit dem Einsatz von Gasmotoren zeigt neben den oben bereits erwähnten Vorteilen hinsichtlich des Schnellstart und des Laständerungsverhaltens auch den Vorteil wesentlich höherer Wirkungsgrade im gesamten Leistungsbereich bis hin zur für die Gasturbine zulässigen Leistungsabsenkung auf 50 %. Für die Abwärmenutzung sind bei Gasturbinenanlagen Abhitzeessel üblich, sodass bei Ausfall der Turbinen keine redundante Wärmebereitstellung geben ist. Wird diese gefordert, kommt dafür nur eine Kesselausführung mit direkter Gasfeuerung infrage.

Nachfolgend beschränkt sich die Betrachtung auf das Anlagenkonzept mit Gasmotoren. Einzige Vorgaben für die Auslegung des Fernwärmekreislaufs mit dem Ziel einer Maximierung der ausgekoppelten Fernwärmeleistung waren die Vor- und Rücklauftemperaturen von 85°C und 55°C, d.h. eine Differenz von 30 K im Referenzfall. Bei berechneter Abwärme von 5,4 MW. (Abgas) und 2,6 MW. (Motor) pro Motorblock ergibt sich im Auslegungsfall für die drei vorgesehenen Motoren bei Vollast eine Gesamtwärmeleistung von 24,0 MW.

**Tabelle 4: Auslegungsdaten für den Referenzfall**

Vorlauftemperatur Fernwärme	55°C
Rücklauftemperatur Fernwärme	85°C
Motorabwärme	2,6 MW
Abgaswärme	5,4 MW
Abwärme Gesamtanlage	24 MW

Die Variante 1 erlaubt keine Fernwärmeleistung bei Ausfall der Motoren. Nur im Motorbetrieb ermöglichen die im Abgasstrom vorgesehenen Kanalbrenner eine Leistungserhöhung, die durch den Abgasmassenstrom und eine Maximaltemperatur von angenommenen 800°C im Kanalbrenner limitiert wird. Dieser Grenzwert entspricht einer maximalen Kanalbrennerleistung pro Motor von 7,7 MW. In den berechneten Fällen ist jeweils nur eine Fernwärmeleistung von maximal 41,1 MW zugrunde gelegt worden, so dass wegen der zwangsläufig anfallenden Abwärme aus dem Motorbetrieb im Referenzfall von 8,00 MW die Kanalbrennerleistung auf 5,7 MW begrenzt werden kann. Damit soll ein ausreichender Sicherheitsabstand zum zulässigen Maximalwert für die Kanalbrennerleistung immer eingehalten werden.

Bei Einsatz eines Zusatzkessels im Fernwärmekreislauf erlaubt dieser die Erhöhung der Fernwärmeleistung bei Motorbetrieb auf den gleichen Wert wie beim Kanalbrennereinsatz, nämlich im Berechnungsfall auf 41,1 MW. Überdies ermöglicht der Zusatzkessel diese Fernwärmeleistung auch bei Ausfall aller Motoren. Diese Variante ist daher der Lösung mit Kanalbrenner überlegen, wenn eine Redundanz gefordert ist. Notwendig jedoch sind dafür ein erheblich höherer Investitionsaufwand und eine leichte Verschlechterung der Primärenergienutzung durch Wärmeverluste des Kessels.

## 5 Ausgewählte Analysefälle

Die durchgeführten Untersuchungen gehen von einem gewählten Referenzfall aus, für den die folgenden Betriebsparameter gelten:

Die Anlage umfasst 3 Motoren, für deren Auslegung eine Umgebungstemperatur von 10°C, ein Luftdruck von 1 bar und eine relative Luftfeuchte von 60 % festgelegt wurde.

Unter diesen Bedingungen kann ein Bruttowirkungsgrad von 44,7 % erreicht werden. Der Eigenbedarf pro Motorsatz wird vom Hersteller mit 220 kW angegeben, zu dem ist ein zusätzlicher elektrischer Eigenbedarf hinzuzurechnen, der auf Grund verschiedener Anlagenkonfigurationen unterschiedlich hoch ausfallen wird. Hier wurde als Richtwert

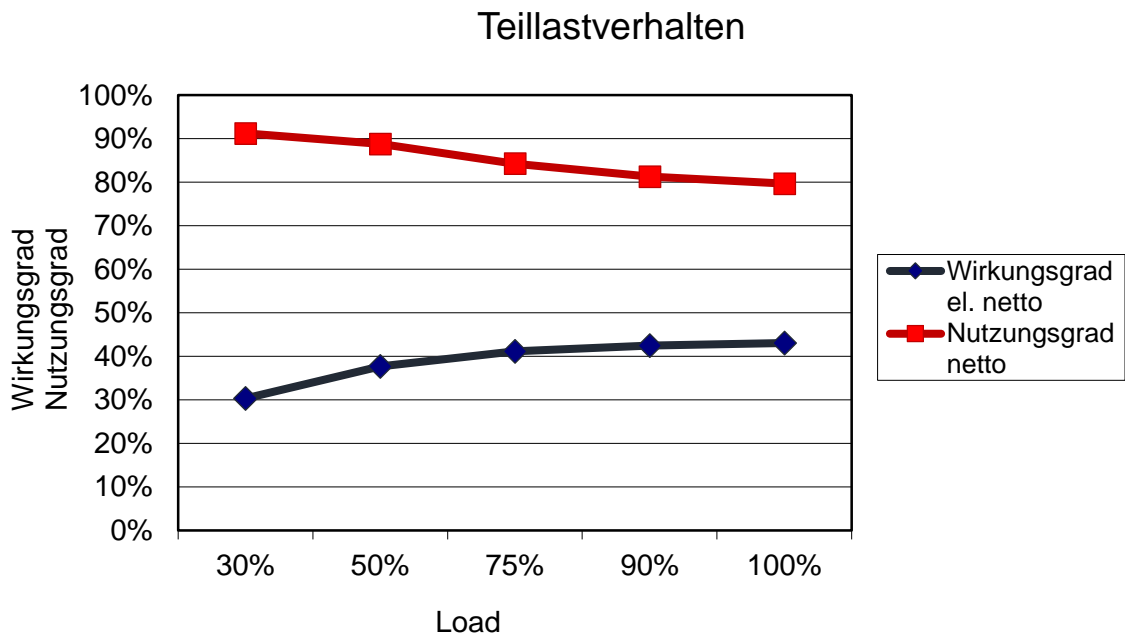
---

150 kW als zusätzlicher Eigenbedarf berücksichtigt. Damit ergibt sich eine elektrische Nettostromleistung von 28,08 MW, entsprechend einem Nettowirkungsgrad von 43,0 %. Die Abwärme der Motoren wird in das nachgeschaltete Fernwärmenetz abgegeben. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur der Fernwärme beträgt 30 K. Bei einer gewählten Vorlauftemperatur von 85°C und entsprechend einer Rücklauf-temperatur von 55°C liefert die Rechnung eine Fernwärmeleistung von 24,11 MW, bei einem Fernwärmemassenstrom von 191 kg/s. Daraus resultiert für den Referenzfall ein Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten Primärenergie von brutto 81,7 % und netto 80,0 %. Es ergibt sich eine Stromkennziffer, entsprechend dem Verhältnis von Nettostromerzeugung zu Nutzwärme, von 1,16.

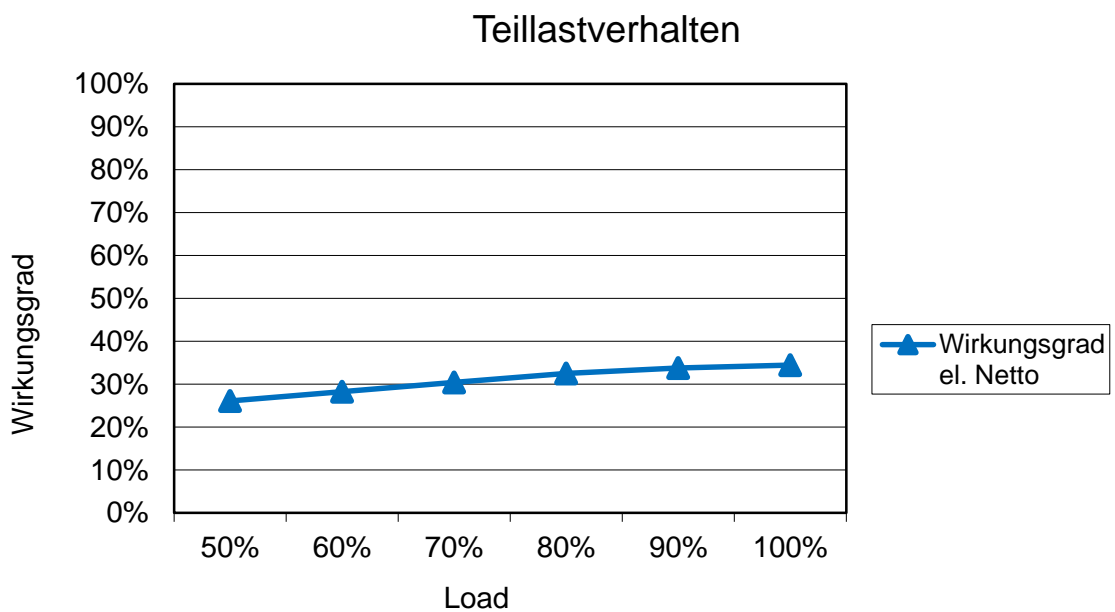
Die Primärenergie in Form von Erdgas wird bei einem Gasdruck von 6 bar und einer Temperatur von 10°C eingesetzt. Im Referenzfall beträgt der stündliche Primärenergiebedarf 65,7 MWh. Bei einem Heizwert  $H_{i,B}$  von 48,226 MJ/kg erfordert dies einen Gas-massenstrom von 1,35 kg/s.

Für die beiden Anlagenkonzeptionen entsprechend den Schaltplänen Abbildung 3 und Abbildung 4 wurden Teillastfälle untersucht. Dabei ist auf geringfügige Differenzen in den Auslegungsdaten für die Fernwärmeleistung hinzuweisen. Sie resultieren daraus, dass in Variante 2 im Fernwärmekreislauf ein Kessel berücksichtigt wird, der in Variante 1 fehlt, weil dabei die Zusatzfeuerung über Kanalbrenner erfolgen soll. Die Abweichungen betragen wenige Promille und sind daher zu vernachlässigen.

Die Teillastuntersuchungen wurden zur Vereinfachung für einen Motor durchgeführt. Es wurden Teillastfälle von 30, 50, 75 und 90% Last berechnet. Nach Angaben des Herstellers sind alle hier betrachteten Teillastzustände für den Dauerbetrieb zulässig [6]. Die Berechnungen wurden zu den oben erläuterten Betriebsparametern durchgeführt und deren Ergebnisse sind aus Abbildung 5 ersichtlich.



**Abbildung 5: Nettowirkungsgrad und Nettoprimärenergienutzungsgrad eines Motors in Abhängigkeit der Last in %**



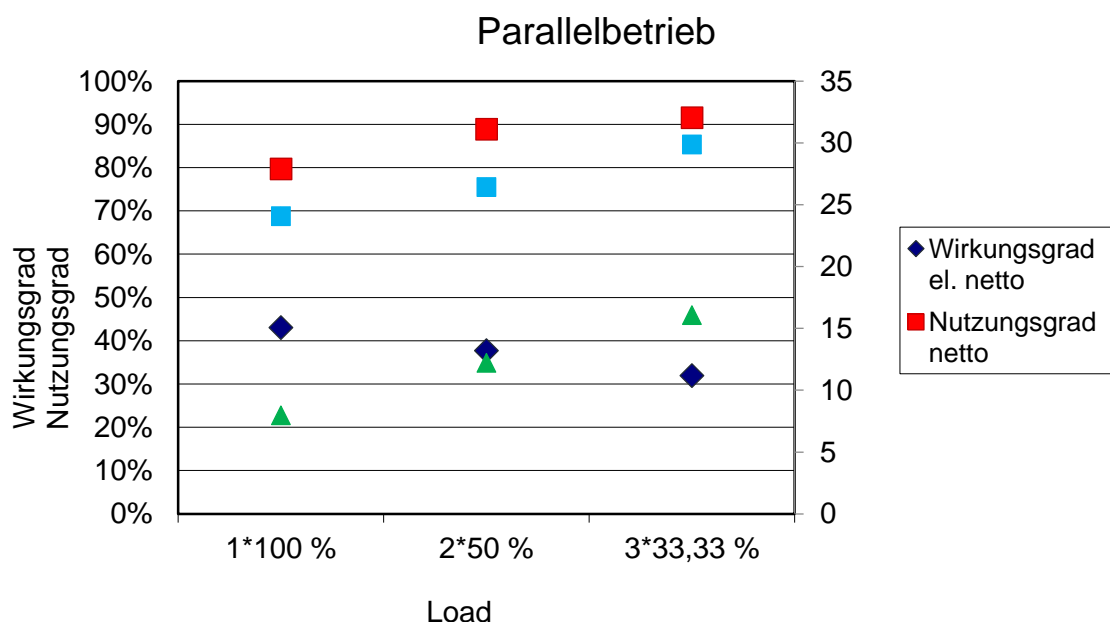
**Abbildung 6: Nettowirkungsgrad einer 15 MW Titan 130 Gasturbine in Abhängigkeit der Last in %**

Der Teillastbetrieb der Gasturbinenanlage ist im Gegensatz zum Motor stärker eingeschränkt. Eine Analyse des Primärenergienutzungsgrades war auf Grund der fehlenden Modellrechnung für das spezifische Fernwärmenetz nicht möglich. Wegen des einge-

schränkten Teillastbereiches und der nur 2-fach vorgesehenen Maschine, ist auch die Flexibilität der gesamten Anlagen eingeschränkt im Vergleich zur Motorvariante.

Für den Parallelbetrieb der Motoren bei Vorgabe einer konstanten elektrischen Leistung entsprechend der Maximalleistung eines Motors der Anlage wurden Betriebsvarianten des Einsatzes der einzelnen Motoren untersucht und einander gegenübergestellt. Dabei wurden zum Vergleich mit einem Motor im Vollastbetrieb die Fälle 2x50% und 3x33,3% Last untersucht. Der Teillast-Parallelbetrieb der Motoren führt in den oben genannten Fällen zu einem Absenken des Anlagenwirkungsgrades vom Vollastreferenzwert für einen Motor von 43,0 % über 37,7 % auf 32,0 %.

Gleichzeitig steigt der Nettoprimärenergienutzungsgrad der Anlage von 79,7 % über 88,9 % auf 91,5 %. Dabei ist zu beachten, dass sich die auskoppelbare Fernwärmeleistung von 7,97 MW über 12,22 MW auf 16,07 MW annähernd verdoppelt, was einer Halbierung der Stromkennziffer entspricht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der Primärenergieeinsatz gleichzeitig von 21,75 MWh/h auf 26,79 MWh/h ansteigt. Im Hinblick auf die unterschiedliche Bewertung von Strom und Wärme zeigen diese Nachteile des parallelen Teillastbetriebes gegenüber dem Vollastbetrieb eines Motors zur Deckung des vorgegebenen Strombedarfs (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7: Parallelbetrieb für Anlagenteillast der Motoren**

Für das Vergleichskonzept mit Gasturbine gibt es nur die Möglichkeit 50 % der Anlagenleistung durch Vollast einer Maschine oder 50 % Last beider Maschinen zu betrachten.

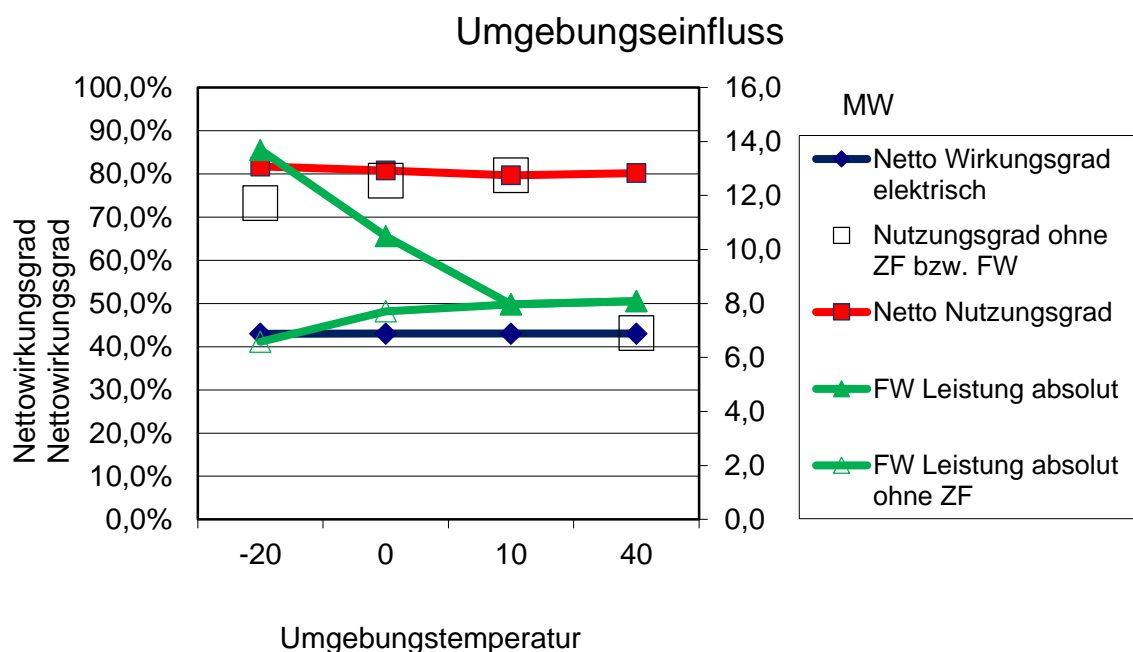
Da die Wärmeleistung im Teillastbereich steigt, kann der Teillastbetrieb beider Maschinen bei entsprechendem Bedarf sinnvoll sein. Bei einer Anlagenlast unterhalb der 50 % muss eine der Maschinen abgeschaltet werden.

Die Variation der Umgebungsbedingungen wurde für einen Motor unter Volllast untersucht. Unterschieden wurden Winter- und Sommerbedingungen sowie ein Übergangsbereich und Jahresdurchschnittswerte. Die in den Rechnungen berücksichtigten Varianten für die Umgebungsbedingungen sind in der nachfolgenden Übersicht Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Umgebungsbedingungen (Temperaturen in °C)**

Fall:	Winter	Sommer	Übergang	Jahresdurchschnitt	Referenzfall
Umgebungstemperatur	-20	40	0	10	10
FW-Vorlauftemperatur	130	75	110	85	85
FW-Rücklauftemperatur	65	60	55	50	55

Die hier behandelten Umgebungseinflüsse auf den elektrischen Nettowirkungsgrad, den Nettoprümerenergie nutzungsgrad mit Zusatzfeuerung im Kanalbrenner sowie die zugehörigen Absolut Werte der Fernwärmeleistung sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Umgebungseinfluss für Betrieb eines Motors**

Auch die Daten der Gasturbine zeigen, dass der elektrische Nettowirkungsgrad nicht signifikant von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird.

Alternativ zur Analyse mit einem Kanalbrenner wurde eine Anlage mit Zusatzwärmeerzeugung durch Einsatz eines gasgefeuerten Heißwasserkessels untersucht. Der dabei erforderliche höhere Investitionsaufwand ist dadurch gerechtfertigt, dass eine Fernwärmedarbietung auch bei Ausfall aller Motoren in vollem Umfang möglich ist.

In der Gegenüberstellung beider Anlagenkonzepte sind nur der „Winterfall“ und der „Übergangsfall“ mit Zusatzfeuerung zu betrachten. Im Winter, bei dem die Stromleistung und Fernwärmeleistung in beiden Varianten identisch sind, ergeben sich Abweichungen ausschließlich in der Primärenergienutzung wegen der höheren Verlustleistung der Kesselanlage gegenüber der Anlage mit Kanalbrenner. Quantitativ sinkt der Nettoprimärenergienutzungsgrad von 81,7 % auf 80,2 %, d.h. die Primärenergienutzung verschlechtert sich um 1,8 %. Im „Übergangsfall“ sinkt die Nettoprimärenergienutzung von 80,8 % auf 79,7 % entsprechend einer Verschlechterung um 1,3 %.

## 6 Bewertung

Die wesentlichen Ergebnisse der hier durchgeführten Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Kreislaufberechnungen liefern für den Wärtsilä Gasmotor mit einer Leistung von maximal 10 MW hohe elektrische Wirkungsgrade. Durch die modulare Bauweise kann die Leistung beliebig erweitert werden. Hier wurde die Zahl auf drei Motoren beschränkt. In diesem Fall erreicht die Anlage Wirkungsgrade deutlich über den Vergleichswerten von Gasturbinenanlagen entsprechender Leistung (siehe Vergleichsanlage Titan130) und sogar die Werte moderner konventioneller Großkraftwerke.

Die untersuchten BHKWs sind allen übrigen modernen KWK-Anlagen hinsichtlich der Betriebsflexibilität überlegen und als Schnellstarteinheiten kleiner und mittlerer Leistung gut geeignet. Sie erfüllen in nahezu idealer Weise die Anforderungen für Regelenergie und können in „Virtuelle Kraftwerke“ einbezogen werden [2].

Die Motoren erlauben den alternativen Einsatz von Erdgas und Biogas als Brennstoff, im letzteren Fall mit Anspruch auf EEG-Vergütung und Einspeisevorrang ins Stromnetz.

Die Analyse des Betriebsverhaltens zeigt, dass ein Teillastbetrieb aller Motoren gegenüber einer Betriebsweise mit einzelnen Motoren unter Volllast bei gleichzeitiger Abschaltung eines oder von zwei Motoren ungünstig ist. Obwohl der Motorhersteller Teillastdauerbetrieb herunter bis zu 30 % Last zulässt [6], ist ein Motorbetrieb mit weniger als 75% Last nicht empfehlenswert. Gegenüber Volllast erleidet die Anlage bei 30 % Teillast der

Motoren eine Wirkungsgradeinbuße von 43,0 % auf 30,3 % entsprechend einer Abnahme um 29,5 %.

Unter der Annahme, dass die Gastemperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur konstant ist, zeigen BHKW-Anlagen mit Gasmotoren keine Auswirkungen in einem weiten Bereich von Umgebungstemperaturen auf den elektrischen Wirkungsgrad. Im Temperaturfeld von -20°C bis 40°C bleibt der elektrische Bruttowirkungsgrad von 44,7 % konstant.

Die untersuchte Flexibilität der Wärmenutzung aus der KWK-Anlage verdeutlicht die Vorzüge des Einsatzes eines zusätzlichen gasgefeuerten Heißwasserkessels im Fernwärmekreislauf gegenüber einer Zusatzfeuerung im Abgasmassenstrom der Motoren durch gasgefeuerte Kanalbrenner. Deren Vorteil besteht lediglich in geringeren Investitionskosten und einer geringfügig besseren Primärenergieausnutzung. Dem gegenüber bietet der Einsatz eines Zusatzkessels volle Redundanz und damit zusätzliche Betriebssicherheit der Fernwärmedarbietung in allen Betriebszuständen bis hin zum Abschalten aller Gasmotoren. Das Vergleichskonzept der Gasturbine mit Abhitzekegel bietet keine Redundanz bei Abschaltung beider Maschinen.

Die vorliegenden Rechenergebnisse belegen eine hohe Primärenergieausnutzung im KWK-Betrieb. In den betrachteten Betriebsfällen erreicht die Anlage ohne Zusatzfeuerung einen Nutzungsgradhöchstwert von 91,2 % und einen Niedrigstwert von immerhin noch 73,3 %. Damit erfüllen die untersuchten BHKW-Anlagen mit Gasmotoren die Vorgaben der EU-Richtlinien zur Erzeugung von hocheffizientem KWK-Strom mit den Vorteilen der Zusatzvergütung und dem Einspeisevorrang des erzeugten Stroms [8]. Dies verdeutlicht auch die volle Wettbewerbsfähigkeit der untersuchten Anlagenkonzepte.

## 7 Literaturverzeichnis

1. M. von Zmuda, *Wärtsilä Engines*, (2011).
2. C. Donnermuth, *Motorische Kraftwerkskonzepte: Von der KWK über Regelenergie*, (2011).
3. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., *BHKW-Kenndaten*, (2011).
4. M. Scherbinski, *Regelenergievermarktung im Rahmen Virtueller Kraftwerke*, (2012).
5. Sofbid GmbH, *Angebot an STEAG encotec GmbH auf EpsilonProfessional zur wärme- und verfahrenstechnischen Simulation von thermodynamischen Kreisprozessen* (2005).
6. Wärtsilä Engines, *Wärtsilä 34SG Power Plant Product Guide*, (2012).
7. Solar Turbines, *Titan 130-2050S Axial GSC 50 Hz*, (2015).
8. Bundesregierung, *KWK-Gesetz 2012 (Novelle)*, (2012).