



**Eco-PIK**

# Ökoeffiziente Prozessintegrierte Klärschlammverwertung

**Kombination aus einer Klärschlammvergasung  
mit einer biologischen Methanisierung und  
einem flexibilisierten Mikrogasturbinenprozess**

**Abschlussbericht**

**Teilprojekt C**

**Förderkennzeichen: 03EI5441C**



**Technische  
Hochschule  
Augsburg**

**Technische Hochschule Augsburg**  
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg  
Maximilian Vogt, Prof. Dr.-Ing. Alexandra Jördening

Verbundpartner:



*energizing future!*

**Blue Energy Group Aktiengesellschaft**  
Daimlerstraße 31, 89250 Senden  
Jochen Sautter, Jacob Mayinger



**bifa Umweltinstitut GmbH**  
Am Mittleren Moos 46, 86167 Augsburg  
Prof. Dr. Nadine Warkotsch, Dr. Klaus Hoppenheidt

**Projektlaufzeit: 01.06.2022 – 31.05.2025**

## DOKUMENTATIONSBLATT

<b>1. ISSN/ISBN</b> --	<b>2. Berichtsart</b> (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Eco-PIK - Ökoeffiziente Prozessintegrierte Klärschlammverwertung Kombination aus einer Klärschlammvergasung mit einer biologischen Methanisierung und einem flexibilisierten Mikrogasturbinenprozess		
<b>4. Autoren</b> (Namen, Vornamen) Jördening, Alexandra Vogt, Maximilian	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.05.2025	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b> --
	<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht	
	<b>8. Durchführende Institutionen</b> (Namen, Adressen) Technische Hochschule Augsburg An der Hochschule 1 86161 Augsburg	
<b>12. Fördernde Institution</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	<b>9. Ber. Nr. Durchführende Institution</b> --	
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03EI5441C	
	<b>11. Seitenzahl</b> 39	
<b>13. Literaturangaben</b> 9	<b>14. Tabellen</b> 8	
	<b>15. Abbildungen</b> 21	
	<b>16. Zusätzliche Angaben</b> --	
<b>17. Vorgelegt bei</b> (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, 28.11.2025		
<b>18. Kurzfassung</b> Der Abschlussbericht fasst die Inhalte der Bearbeitung des Teilprojekts C „Flexibilisierter Mikrogasturbinenprozess mit Kraft-Wärme-Kopplung“ im Zeitraum 01.06.2022 bis 31.05.2025 zusammen.		
<b>19. Schlagwörter</b> Klärschlammvergasung, Biomethanisierung, flexibilisierter Mikrogasturbinenprozess		
<b>20. Verlag</b> --	<b>21. Preis</b> --	

## DOCUMENT CONTROL SHEET

<b>1. ISSN/ISBN</b> --	<b>2. type of document</b> (e. g. report, publication) report	
<b>3. title</b> Eco-PIK - Ecoefficient Process Integrated Sewage Sludge Utilization Combination of a Sew-age Sludge Gasification with Biological Methanation in situ of anaerobic Fermentation and a flexible Micro Gas Turbine Process		
<b>4. Authors</b> (family name, first names(s)) Jördening, Alexandra Vogt, Maximilian	<b>5. end of project</b> --	
	<b>6. publication date</b> --	
	<b>7. form of publication</b> report	
<b>8. performing organizations</b> (Name, adress) Technische Hochschule Augsburg An der Hochschule 1 86161 Augsburg	<b>9. originator's report no.</b> --	
	<b>10. reference no.</b> 03EI5441C	
	<b>11. no. of pages</b> 39	
<b>12. sponsoring agency (name, adress)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	<b>13. no. of references</b> 9	
	<b>14. no. of tables</b> 8	
	<b>15. no. of figures</b> 21	
<b>16. supplementary notes</b> --		
<b>17. presented at</b> (title, place, date) Projektträger Jülich, 28.11.2025		
<b>18. abstract</b> The report summarizes the contents of the processing of subproject C "flexible micro gas turbine process" during the period 01.06.2022 to 31.05.2025.		
<b>19. keyword</b> Sewage sludge gasification, biological methanation, flexible micro gas turbine process		
<b>20. publisher</b> --	<b>21. price</b> --	





## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Übersicht der geplanten Projektaktivitäten .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teilprojekt C: flexibilisierter Mikrogasturbinenprozess mit Kraft-Wärme-Kopplung .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>AP 3.1 Vorstudien Prozessdesign .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Designstudien zum aufgeladenen MGT-Prozess .....	3
2.1.2	CFD- und FEM-Analyse des MGT-Verdichterlaufrades.....	10
<b>2.2</b>	<b>AP 3.2 Experimentelle Validierung der Prozessmodelle (ersetzt durch simulative Fehlerabschätzung).....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>AP 3.3 Dimensionierung des MGT-Prozesses für Pilotanlage.....</b>	<b>15</b>
2.3.1	Skalierungstool des aufgeladenen MGT-Prozesses.....	15
2.3.2	Skalierung des MGT-Prozesses für verschiedene Gesamtprozessvarianten .....	16
2.3.3	Vergleich zwischen einer einfachen MGT, einer aufgeladenen MGT und eines Gasmotors .....	19
<b>2.4</b>	<b>Vernetzung aller Teilsysteme in den Gesamtprozess (AP 3.4).....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Varianten des Eco-PIK Prozesses (Prozessbeschreibung).....	23
2.4.2	Vergleich der Energiebilanzen der Eco-PIK Prozessvarianten .....	24
<b>2.5</b>	<b>Fazit und Ausblick zum Teilprojekt C.....</b>	<b>26</b>
<b>A</b>	<b>Anhang Teilprojekt C.....</b>	<b>30</b>



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Balkenplan der geplanten Projektaktivitäten .....	1
Abbildung 2: Modellierungsprozess (gelb: abgeschlossene Teilschritte; grau: ausstehende Teilschritte).....	4
Abbildung 3: Konzeptvarianten für einen aufgeladenen Mikrogasturbinenprozess .....	4
Abbildung 4: Simulationsmodelle der aufgeladenen C30 Mikrogasturbine (Konzept 1 links; Konzept 2 rechts).....	6
Abbildung 5: Simulationsergebnisse der idealen Aufladung (Konzept 1 links; Konzept 2 rechts).....	7
Abbildung 6: Simulationsmodell für das reale Aufladungskonzept 1 ( $n=80.000\text{min}^{-1}$ , $TET=860^{\circ}\text{C}$ , $\Pi_{TLV}=1,8$ ) .....	8
Abbildung 7: CAE Model des C30 Verdichterlaufrads.....	10
Abbildung 8: Randbedingungen für die CFD-Simulationen.....	11
Abbildung 9: Vergleichsspannungen im Verdichterlaufrad.....	11
Abbildung 10: Differenz der Vergleichsspannungen .....	12
Abbildung 11: Simulationsergebnisse Auslegungspunkt mit markierten Haupteinflussgrößen.....	13
Abbildung 12: Sensitivitätsanalyse der Haupteinflussgrößen.....	14
Abbildung 13: Fehlerbänder bei Abweichung der Haupteinflussgrößen.....	15
Abbildung 14: Skalierungsprozess des aufgeladenen MGT-Prozesses .....	16
Abbildung 15: Skalierter MGT-Prozess (Variante: Methanisierung mit Dampf + Sauerstoff) .....	17
Abbildung 16: Beispielergebnis: Wärmeregulung über TL-Bypass .....	18
Abbildung 17: Elektrische und thermische Leistung in Abhängigkeit vom Turbolader- Bypass.....	19
Abbildung 18: Energie- und Massenströme (Variante 1 Standard Kläranlagenprozess) .....	30
Abbildung 19: Energie- und Massenströme (Variante2 Vergasung, Methanisierung mit Luft, Verstromung) .....	30
Abbildung 20: Energie- und Massenströme (Variante 3 Vergasung, Methanisierung mit Dampf+O <sub>2</sub> , Verstromung).....	31
Abbildung 21: Energie- und Massenströme (Variante 4 Vergasung ohne Methanisierung und Verstromung).....	31

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zusammenarbeit mit Projektpartnern, Blue Energy und bifa Umweltinstitut .....	3
Tabelle 2: Ideale und reale Aufladung ( $n=80.000\text{min}^{-1}$ , $TET=860^{\circ}\text{C}$ , $\Pi_{TLV}=1,8$ ) für Aufladungsvariante 1 .....	8
Tabelle 3: Leistungsdaten der dimensionierten MGT-Anlagen für verschiedene Prozessvarianten .....	17
Tabelle 4: Bewertung einfache Mikrogasturbine .....	20
Tabelle 5: Bewertung aufgeladene Mikrogasturbine .....	21



---

Tabelle 6: Bewertung Gasmotor .....	22
Tabelle 7: Vergleichende Gesamtwertung MGT, aufgeladene MGT und Gasmotor.....	23
Tabelle 8: Energiebilanzen der Gesamtprozessvarianten.....	25





# 1 Übersicht der geplanten Projektaktivitäten

Das Eco-PIK-Verbundprojekt untergliedert sich in 6 Arbeitspakete, an denen die Projektpartner bifa Umweltinstitut GmbH, Blue Energy Group Aktiengesellschaft und die Technische Hochschule Augsburg zu unterschiedlichen Anteilen beteiligt sind (Abbildung 1).

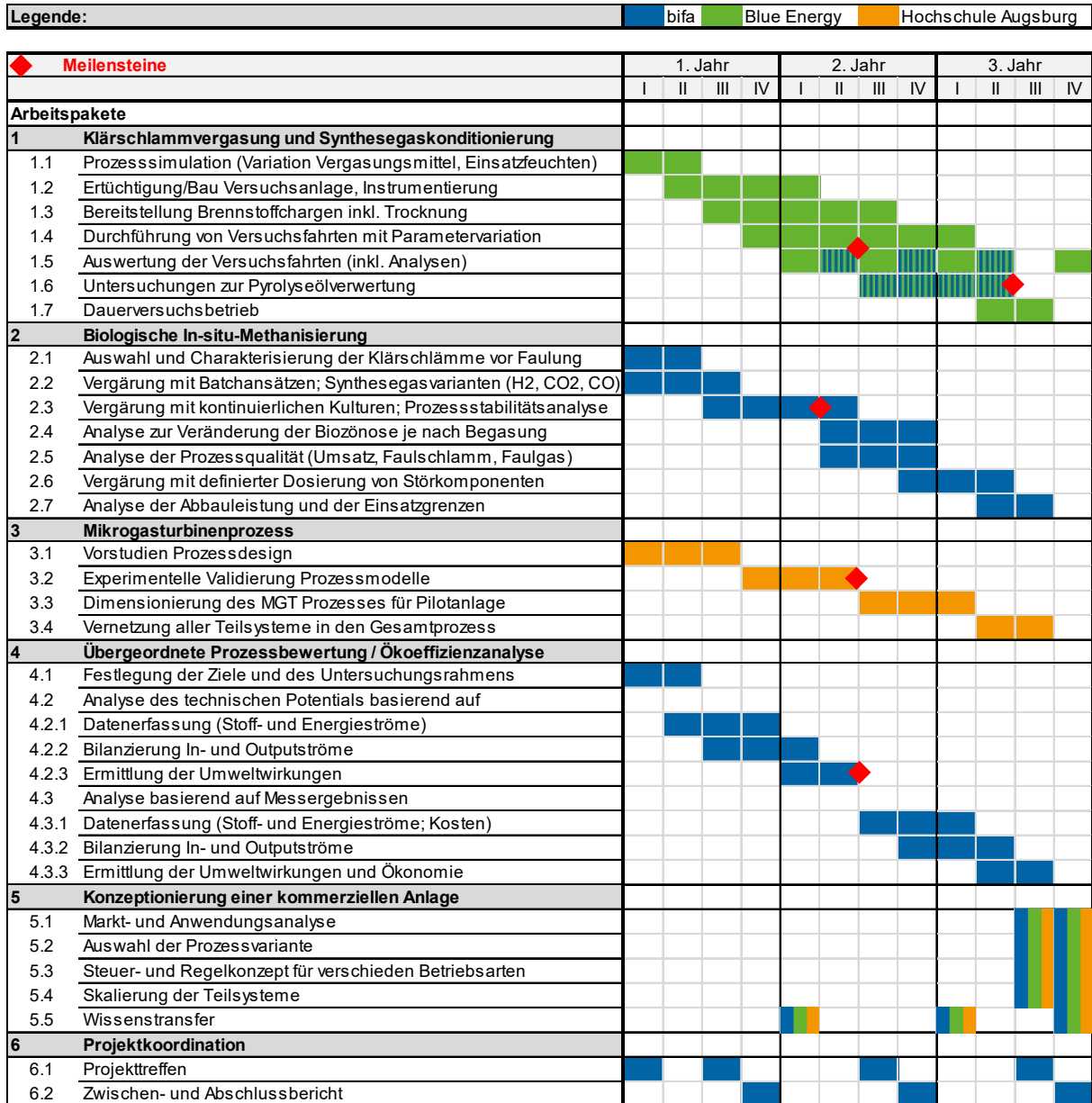


Abbildung 1: Balkenplan der geplanten Projektaktivitäten

Nachfolgend ist der Sachstand des Teilprojekts C für den Berichtszeitraum 01.06.2022 bis 31.05.2025 dargestellt.

Der Sachstand der Teilprojekte A „Thermochemische Vergasung von Klärschlamm“ und B „Biologische in-situ-Methanisierung in der anaeroben Vergärung“ werden in einem separaten Bericht dargestellt.



## 2 Teilprojekt C: flexibilisierter Mikrogasturbinenprozess mit Kraft-Wärme-Kopplung

Mikrogasturbinen finden Anwendung als dezentrale KWK-Anlagen für eher kleine (< 1MW elektrisch) Leistungsbereiche, wie z.B. Biogas- oder Kläranlagen. Damit sind sie eine Alternative zu den stärker verbreiteten motorischen Blockheizkraftwerken (BHKW). Im Abschnitt 4.3.3 werden die Vor- und Nachteile der beiden Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Varianten gegenübergestellt.

Marktführer im Mikrogasturbinensegment ist der amerikanische Hersteller Capstone. Deren einstufige Mikrogasturbine (MGT) C200 erreicht als Einzelmodul einen elektrischen Wirkungsgrad von 31% bei einer elektrischen Leistung von 200 kW, [<https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter>]. Der Wirkungsgrad von Kleingasturbinen ist bedingt durch grössere interne Verluste deutlich niedriger, als der von grossen Kraftwerksgasturbinen.

Leistung und Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren können durch die Nachschaltung eines Abgasturboladers gesteigert werden. Hierbei wird das heiße Motorabgas der Turbine eines Turboladers zugeführt, welche fest über eine Welle verbunden ein Verdichterlaufrad antreibt. Das Verdichterlaufrad des Turboladers befindet sich vor dem Lufteinlass des Motors und erhöht den Eingangsdruck als auch die Menge des Luftmassenstroms. Die Luftmassenstromsteigerung infolge der Aufladung erhöht wiederum die Leistung des Verbrennungsmotors und ist Stand der Technik bei Verbrennungsmotoren.

Das Konzept der Abgasturboaufladung lässt sich auch auf einen Gasturbinenprozess übertragen, wurde aber bisher nicht umfassend erforscht. Ähnlich zum aufgeladenen Verbrennungsmotor kann auch hier der Eingangsdruck der MGT erhöht werden, um eine Verbesserung der Leistungsdaten der Maschine zu erzielen. Darüber hinaus bietet die Turboaufladung die Möglichkeit, als Regelelement den Lastbereich der Maschine zu erweitern und zu flexibilisieren.

Im Teilprojekt C des Verbundprojektes sollte von der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik der TH Augsburg ein mikrogasturbinenbasierter KWK-Prozess mit Turbolaufladung zur Klärschlammverwertung entworfen, validiert und bewertet werden. Das Teilprojekt ist im Arbeitspaket AP3 des oben dargestellten Projektplans verankert und unterstützt darüber hinaus die Arbeitspakete 5 bzw. 6, welche die übergeordnete Bewertung der prozessintegrierten Klärschlammverwertung und die Konzeption einer Pilotanlage vorsehen.

Das Arbeitspaket AP 3 umfasst mit den Teilaufgaben AP 3.1 (Vorstudien Prozessdesign), AP 3.2 (Experimentelle Validierung der Prozessmodelle), AP 3.3 (Dimensionierung des MGT-Prozesses für Pilotanlage) und AP 3.4 (Vernetzung aller Teilsysteme in den Gesamtprozess) alle Projektaktivitäten zur Konzeption und Untersuchung einer aufgeladenen Mikrogasturbine, in die die Projektpartner Blue Energy und bifa Umweltinstitut unterschiedlich stark eingebunden waren, wie die nachfolgende Tabelle 1 aufzeigt.



Arbeitspaket	Zusammenarbeit
AP 3.1 Vorstudien Prozessdesign	keine
AP 3.2 Experimentelle Validierung der Prozessmodelle	keine
AP 3.3 Dimensionierung des MGT-Prozesses für Pilotanlage	Abstimmung insbes. mit bifa; Design und Dimensionierung des MGT-Prozesses abhängig vom Gesamtprozess
AP 3.4 Vernetzung aller Teilsysteme in den Gesamtprozess	enge Abstimmung mit beiden Partnern hinsichtlich Definition und Quantifizierung von Schnittstellengrößen sowie Datenaustausch zur Ökoeffizienzanalyse

Tabelle 1: Zusammenarbeit mit Projektpartnern, Blue Energy und bifa Umweltinstitut

Bei den Arbeitspaketen 3.1 und 3.2 war die Forschungsarbeit der Hochschule weitestgehend unabhängig von den Projektpartnern. Dennoch wurden die Fortschritte in regelmäßigen Projektbesprechungen kommuniziert. Die Arbeitspakete 3.3 und 3.4 erforderten einen engen Austausch mit bifa und Blue Energy, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Die Resultate der einzelnen Arbeitspakete werden in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

## 2.1 AP 3.1 Vorstudien Prozessdesign

### 2.1.1 Designstudien zum aufgeladenen MGT-Prozess

In den Designstudien im Rahmen des AP 3.1 wurden verschiedene Aufladungskonzepte einer Mikrogasturbine (MGT) mit einem Turbolader (TL) zur Steigerung des Betriebsdruckes untersucht. Als Referenzmaschine wurde eine Capstone C30 Mikrogasturbine gewählt, da diese als Versuchsmaschine im Strömungsmaschinenlabor der Hochschule Augsburg verfügbar ist und für Validierungsversuche vorgesehen war. Durch die Aufladung der Mikrogasturbine kann deren Leistungsspektrum erweitert und eine Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung erzielt werden. Die flexible und bedarfsgerechte Energiebereitstellung von elektrischer zu thermischer Energie wird in zukünftigen Energieversorgungskonzepten ein wesentlicher Bewertungsparameter sein. Herangehensweise und Teilschritte des Modellierungsprozesses sind in Abbildung 2 dargestellt und werden mit den gewonnenen Resultaten nachfolgend erläutert.

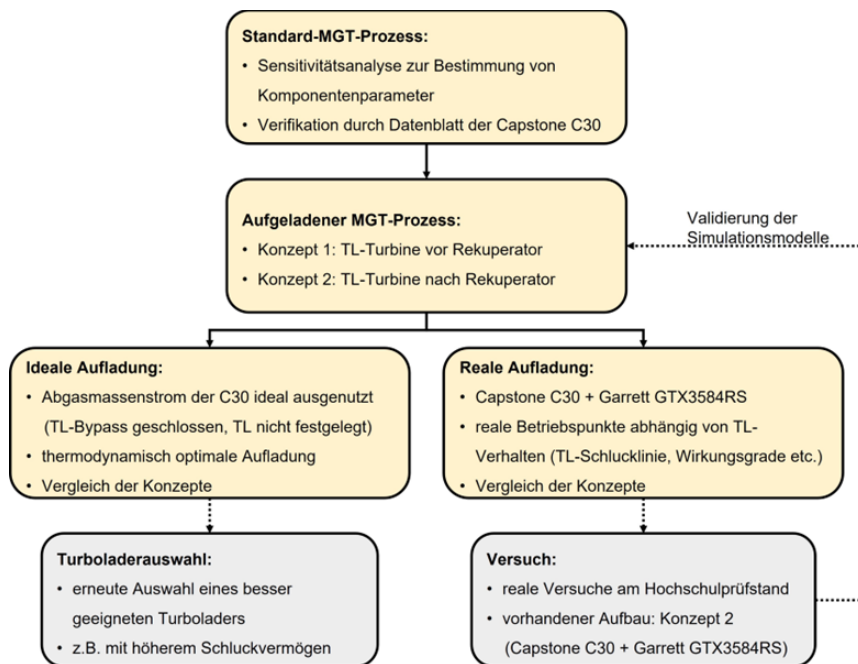


Abbildung 2: Modellierungsprozess (gelb: abgeschlossene Teilschritte; grau: ausstehende Teilschritte)

### Vorgehensweise und Umfang der Untersuchungen

Für die Anbindung eines Turboladers an den Gasturbinenprozess bestehen verschiedene Optionen. Als Ausgangspunkt und Bewertungsgrundlage der verschiedenen Anbindungsvarianten wurde zunächst der Standard-Mikrogasturbinenprozess ohne Turbolader abgebildet. Dazu wurde die ausgewählte Referenzturbinen Capstone C30 mit der Simulationssoftware Epsilon Professional modelliert. Durch den Vergleich mit Literatur und Herstellerangaben konnten bauteilspezifische Parameter für die Simulation abgeglichen werden und ein verifiziertes Ausgangsmodell generiert werden (Startpunkt in Abbildung 2).

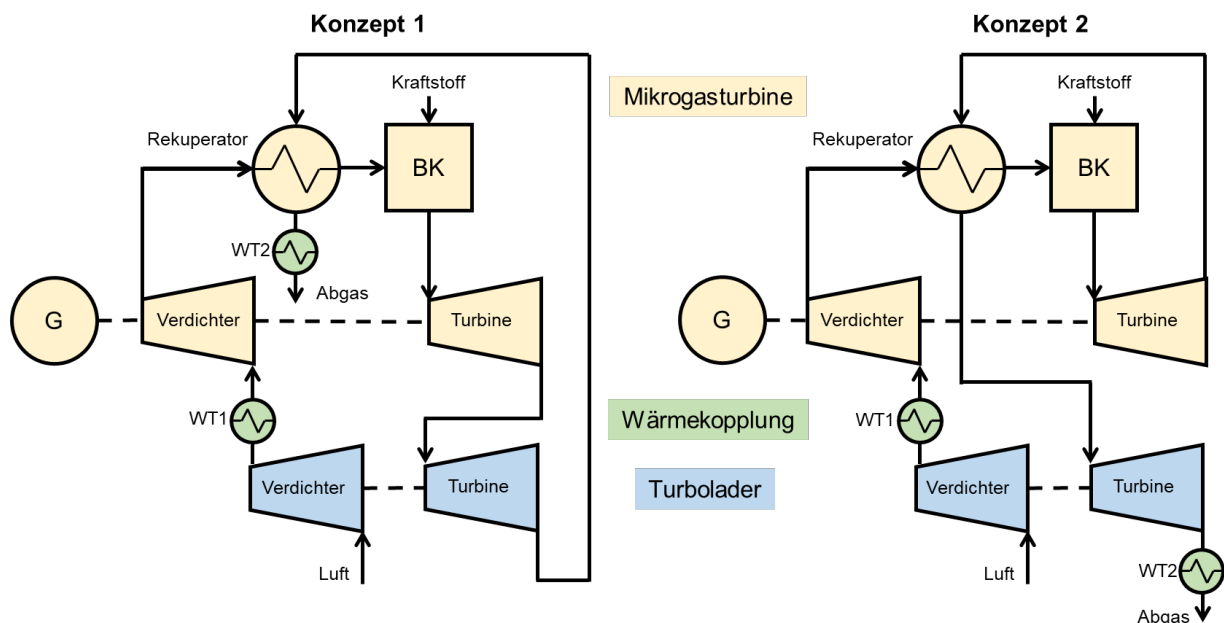


Abbildung 3: Konzeptvarianten für einen aufgeladenen Mikrogasturbinenprozess



Die betrachteten Aufladungsvarianten unterscheiden sich u.a. hinsichtlich der Rekuperatorintegration. Die aus umfangreichen Vorstudien abgeleiteten aussichtsreichsten Varianten sind in Abbildung 3 dargestellt und werden nachfolgend kurz beschrieben.

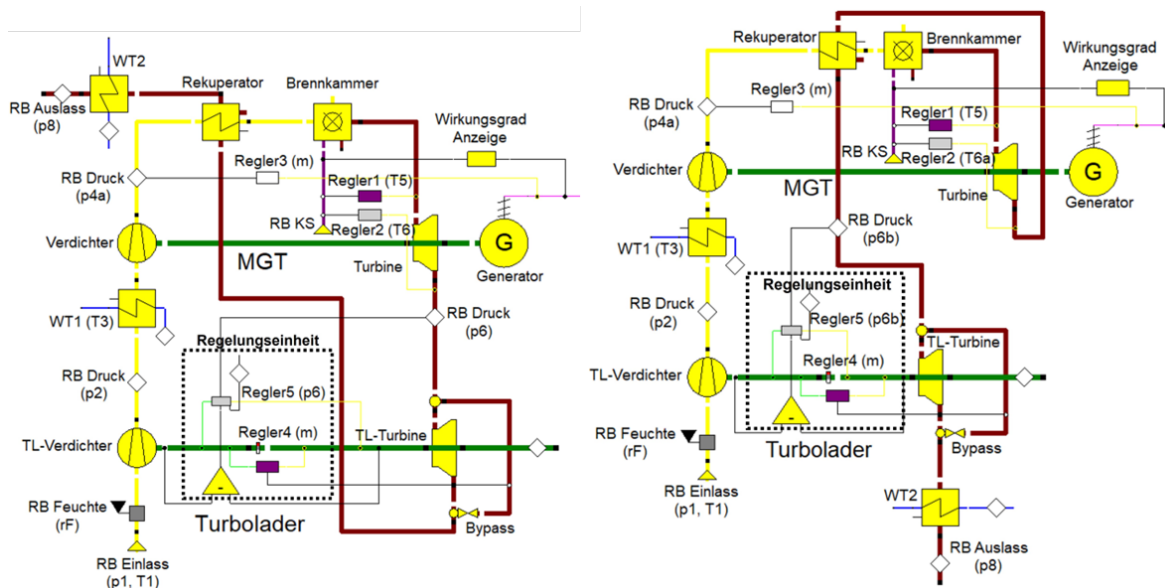
Beim ersten Konzept wird die Turbine des Turboladers (blau) zwischen der Mikrogasturbinenstufe (gelb) und dem Rekuperator platziert. Dagegen befindet sich bei Konzept 2 die Turboladerturbine im Abgasstrang der Mikrogasturbine hinter dem Rekuperator. Beide Konzepte übertragen die in der Turboladerturbine umgesetzte Arbeit auf eine Verdichterstufe, welche den Eingangsdruck der Mikrogasturbine erhöht. Der Wärmetauscher (WT1) wird zur Zwischenkühlung der vorverdichteten Luft verwendet, um die Wirksamkeit der zweiten Verdichterstufe in der MGT zu verbessern. Insgesamt werden sowohl das Druckniveau und als auch der Massenstrom der Gasturbine erhöht. Dementsprechend kann die Leistung des Gasturbinenprozesses gesteigert werden, die über den Generator abgeführt wird. Die Restwärme des Abgases kann zusammen mit der bei der Rückkühlung der Luft freigesetzten Wärme in anderen Teilprozessen der Klärschlammvergasung (z.B. zur Wasserdampferzeugung) genutzt werden.

Die beiden Aufladungskonzepte wurden mit jeweils zwei Modellansätzen untersucht, der idealen und der realen Aufladung (s.a. Teilschritt 'Ideale Aufladung' und 'Reale Aufladung' in Abbildung 2).

Bei der idealen Aufladung wird die Capstone C30 Mikrogasturbine mit einem idealisierten Turbolader erweitert. Dieser idealisierte Turbolader verfügt in den Simulationen über ein unbegrenztes Schluckvermögen, wodurch der komplette Abgasmassenstrom der Mikrogasturbine in jedem Betriebspunkt vollständig durch den Turbolader geleitet wird. Durch die vereinfachte Modellbetrachtung können viele Betriebspunkte simuliert werden und Erkenntnisse zur Auswahl des Turboladers gewonnen werden.

Das reale Aufladungsmodell berücksichtigt dagegen das Verhalten des für die Aufladung der Capstone C30 Mikrogasturbine ausgewählten Turboladers Garrett GTX3584RS, dessen Kennfelddaten kompatibel zum Betriebsbereich der C30 sind. In das reale Aufladungsmodell wurde insbes. die Schluckgrenze des Turboladers einbezogen.

Die Epsilon-Simulationsmodelle sind in Abbildung 4 dargestellt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Aufladungskonzepte, sind aber unabhängig von den Modellansätzen ideal / real.



**Abbildung 4:** Simulationsmodelle der aufgeladenen C30 Mikrogasturbine (Konzept 1 links; Konzept 2 rechts)

In den Simulationsmodellen wird das Verhalten der Prozesskomponenten (Strömungsmaschinen, Wärmetauscher, Verbindungsleitungen, Regelelemente, usw.) abgebildet. Neben den Randbedingungen des zu betrachtenden Betriebspunktes wie Drücke, Temperaturen und Drehzahl sind bauteilspezifische Simulationsparameter wie Wirkungsgrade und Druckverluste in den einzelnen Prozesselementen einzustellen. Diese Komponentenparameter wurden durch das kalibrierte Ausgangsmodell des Standardprozesses zuvor bestimmt und in die Simulationsmodelle der aufgeladenen MGT übertragen.

Die Ergebnisse der Vorstudien umfassen die Simulationsergebnisse der idealen und realen Aufladung für beide Aufladungskonzepte. Für beide Konzeptvarianten wurden eine Vielzahl von Betriebspunkten simuliert und daraus die Betriebscharakteristiken abgeleitet. Diese sind gekennzeichnet durch die Drehzahl  $n$  der MGT und dem Verdichtungsverhältnis  $\pi_{TL,V}$  des Turboladers. Die Turbineneintrittstemperatur ( $T_{ET}$ ) wird zur Vergleichbarkeit auf einen festen Wert  $T_{ET} = 860^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Zunächst werden die Ergebnisse der idealen Aufladung zusammengefasst.



### Simulationsergebnisse der idealen Aufladung

Die elektrische Leistung und der elektrische Gesamtwirkungsgrad sind in Abbildung 5 für das Konzept 1 (links) und das Konzept 2 (rechts) dargestellt. Außerdem enthalten die Diagramme die Referenzwerte des einfachen MGT-Prozesses zum Vergleich (schwarze Kurvenpunkte).

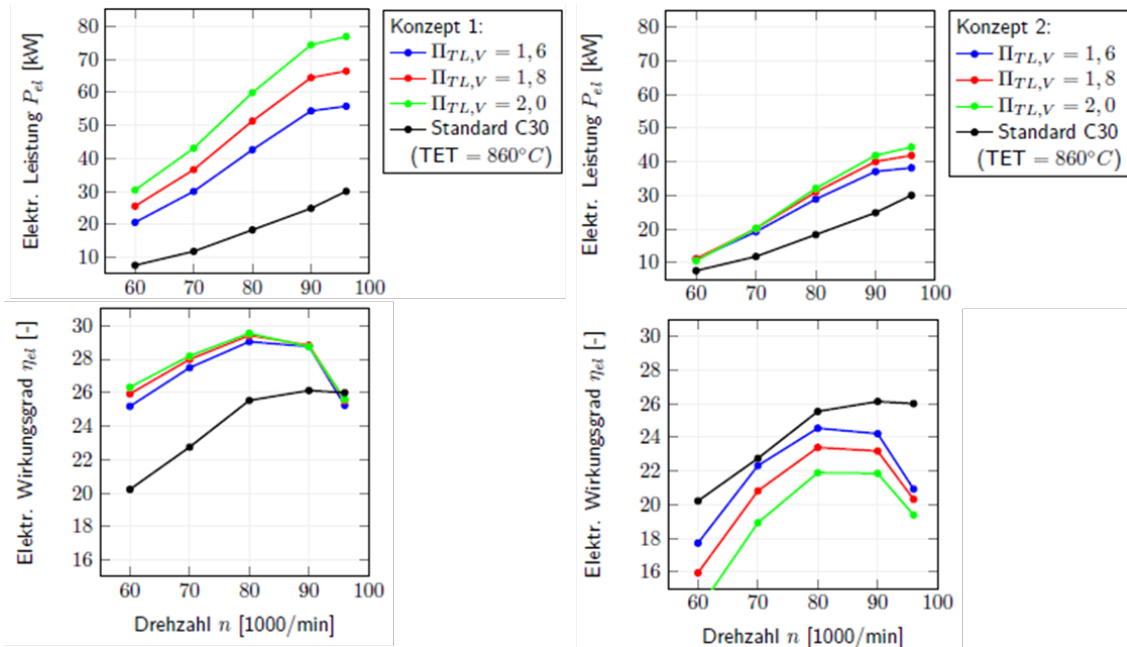


Abbildung 5: Simulationsergebnisse der idealen Aufladung (Konzept 1 links; Konzept 2 rechts)

Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass durch Konzept 1 eine deutliche Leistungssteigerung gegenüber dem Standardprozess erzielt werden kann (im optimalen Wirkungsgradpunkt bei einer Drehzahl von  $80.000 \text{ min}^{-1}$  ca. + 180%). Gleichzeitig kann der Wirkungsgrad im Teillastbereich (für  $n < 96.000 \text{ min}^{-1}$ ) um mehrere %-Punkte verbessert werden.

Beim zweiten Konzept wird die Leistung im Wirkungsgradoptimum ebenfalls deutlich (um knapp +60%) erhöht bei gleichzeitigem Abfall des Wirkungsgrades um ca. 6%-Punkte. Das Konzept 1, in dem das Turbinenabgas direkt auf den ATL geführt wird, ist also thermodynamisch gegenüber dem Konzept 2, in dem das Turbinenabgas zunächst durch den Rekuperator geführt wird, überlegen. Die höhere Eintrittstemperatur der TL-Turbine (Konzept 1:  $> 600^\circ C$ ; Konzept 2:  $< 290^\circ C$ ) führt zu einer höheren Effektivität des Turboladers.

Die Steigerung der Leistungsdaten fallen für den idealisierten Aufladungsprozess ohne Beschränkung der ATL-Schluckfähigkeit grösser aus, als im realen Prozess. Für diesen werden exemplarisch die Simulationsergebnisse der Aufladungsvariante 1 im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst.

### Simulationsergebnisse der realen Aufladung

Der dargestellte Betriebspunkt wurde bei einer MGT-Teillastdrehzahl von  $n=80.000 \text{ min}^{-1}$  simuliert, was der wirkungsgradoptimierten Auslegungsdrehzahl der Capstone C30 entspricht. Um Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der idealen Aufladung zu gewährleisten, wurde eine Turbineneintrittstemperatur von  $T_{ET}=860^\circ C$  und ein Turboladerdruckverhältnis von  $\Pi_{TL,V}=1,8$  eingestellt.



Abbildung 6 zeigt das Epsilon Simulationsmodell der realen Aufladungsvariante 1 mit den Hauptbetriebsparametern. Es kann an jeder Fluidleitung der Druck, die Temperatur, die Enthalpie und der Massenstrom des Arbeitsmittelstrom abgelesen werden. Die elektrische Gesamtleistung beläuft sich auf 36kW, was einer Steigerung von ca. 100% entspricht bei einem Wirkungsgrad von 22,3%. Außerdem ist zu erkennen, dass ca. 34% des Abgasmassenstroms über den Turbolader-Bypass ungenutzt am Turbolader vorbeigeführt wird. Der Bypass muss betriebspunktabhängig teilöffnen, da das Schluckvermögen des Turboladers erreicht wird.

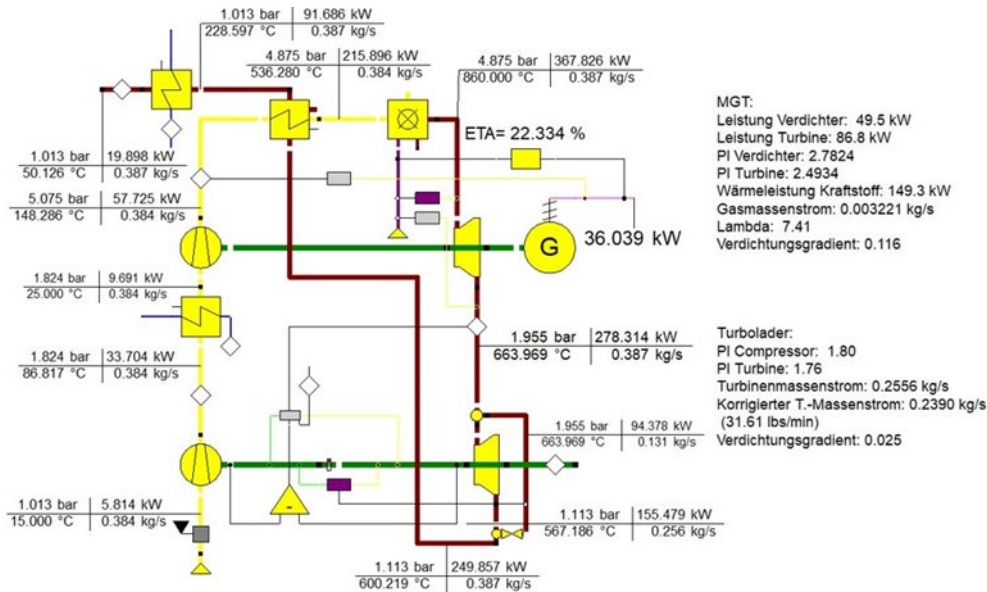


Abbildung 6: Simulationsmodell für das reale Aufladungskonzept 1 ( $n=80.000\text{min}^{-1}$ ,  $TET=860^\circ\text{C}$ ,  $\Pi_{TLV}=1,8$ )

Die mit der idealen und realen Aufladungssimulation erzielten Leistungsdaten sind in Tabelle 2 gegenübergestellt, ebenso die des standardisierten C30 Mikrogasturbinenprozess ohne Turbolader.

Sim.	Turbolader			Mikrogasturbine			Gesamtsystem	
	$\dot{m}_{TBP}$ [kg/s]	$\Pi_{TLV}$ [-]	$\Pi_{TLT}$ [-]	$\Pi_V$ [-]	$\Pi_T$ [-]	$\dot{m}$ [kg/s]	$P_{el}$ [kW]	$\eta_{el}$ [%]
ideal	0,0	1,80	1,43	2,78	3,06	0,388	51,3	29,4
real	0,131	1,80	1,76	2,78	2,49	0,387	36,0	22,3
Standard C30 →				2,85	2,42	0,213	18,3	25,5

Tabelle 2: Ideale und reale Aufladung ( $n=80.000\text{min}^{-1}$ ,  $TET=860^\circ\text{C}$ ,  $\Pi_{TLV}=1,8$ ) für Aufladungsvariante 1

Hierbei ist festzustellen, dass durch eine Turboaufladung grundsätzlich eine Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung gegenüber dem Standardprozess möglich ist.

Die Simulation der realen Aufladung mit dem Garrett GTX3584RS Turbolader prognostiziert im betrachteten Betriebspunkt eine Verdopplung der Leistung auf 36kW gegenüber dem Standardprozess (18,3kW). Gleichzeitig nimmt jedoch der Wirkungsgrad um ca. 3 %-Punkte auf 22,3% ab.



Ein verbesserter Wirkungsgrad liesse sich durch einen größeren Turbolader mit höherem Schluckvermögen erzielen. Dadurch würde sich der ungenutzte Teilmassenstrom  $\dot{m}_{\text{TBP}}$  durch den Turbolader-Bypass minimieren und die Realergebnisse der idealen Simulation annähern. Hier liegt der Nachteil der Aufladung einer MGT im Vergleich zum Motorischen Aufladungsprozess. Um einen vergleichbaren Effekt zu erzielen, benötigt die MGT einen deutlich größeren Turbolader, als ein Motor der gleichen Leistungsklasse. Das liegt an dem vielfach größeren Verbrennungsluftverhältnis der MGT (MGT ca. 4-7; Motor ca. 1-2). Dementsprechend ist bei der MGT zur gleichen Leistungssteigerung ein höheres Schluckvermögen des Turboladers notwendig.

Neben der thermodynamischen Bewertung muss auch die konstruktive Umsetzbarkeit und die strukturmechanische Beanspruchung der Aufladung beachtet werden.

Die Druckerhöhung und die veränderte Druckverteilung in der MGT können die Lebensdauer der MGT-Komponenten reduzieren. Für eine Beurteilung wurden umfassende CFD- und FEM-Analysen durchgeführt, die in Abschnitt 4.1.2 zusammengefasst werden. Die Druckverteilung und das damit verbundene Lastbild ist bei Konzept 1 ähnlich zum Standardprozess und verändert sich dagegen stärker beim Konzept 2, was ein weiterer Vorteil für das thermodynamisch präferierte Konzept 1 darstellt.

Demgegenüber bietet aber die Aufladungsvariante 2 einen Vorteil bei der konstruktiven Umsetzung. Die Anbindung des Turboladers gemäß Konzept 2 ist einfacher, da sie nur im Abgasstrang ansetzt und damit unabhängig von der MGT-Bauform ist. Bei Konzept 1 müsste die Turbine des Turboladers zwischen MGT-Turbine und Rekuperator integriert werden, was je nach Bauform der MGT mit einer tendenziell sehr kompakten Ausführung aufwändig sein kann. Hier haben Mikrogasturbinen mit einem externen Rekuperator (z.B. bei der Turbec T100) einen deutlichen Vorteil gegenüber der Capstone C30 mit einem internen Wärmetauscher.

#### **Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Simulationsarbeiten sind:**

- Die Turboaufladung einer MGT mit Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung ist möglich, sofern ein ausreichend großer Turbolader verbaut wird.
- Die Integration des Turboladers vor den Rekuperator der MGT (Aufladungskonzept 1) ist thermodynamisch vorteilhafter. Die höheren Eintrittstemperaturen in die ATL-Turbine führen zu einer höheren Effektivität.
- Im Vergleich zur Motoranwendung erfordert die Aufladung der MGT mit einem hohen Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  ( $\lambda_{\text{MGT}}$  ca. 4-7,  $\lambda_{\text{Motor}}$  ca. 1-2) einen ATL mit höherem Schluckvermögen.
- Die Druckverteilung (Druckverhältnisse von MGT-Verdichter und -Turbine) und die damit einhergehende mechanische Belastung ist von der Integration des ATL in den Aufladungsprozess abhängig. Das Lastbild ist bei der Integration des ATL's vor dem Rekuperator (Aufladungskonzept 1) ähnlich zum Standardprozess; bei der Integration hinter dem Rekuperator treten größere Abweichungen auf.
- Die Integration des Turboladers zwischen MGT-Turbine und Rekuperator hängt von der Bauform der MGT ab und ist konstruktiv aufwändiger als die Platzierung im Abgasstrang hinter dem Rekuperator. Dieser Punkt kann für die Retrofitierung bereits bestehender Maschinen ausschlaggebend sein.



### 2.1.2 CFD- und FEM-Analyse des MGT-Verdichterlaufrades

Die Steigerung von Leistung und Wirkungsgrad im aufgeladenen MGT-Prozess geschieht vor allem durch den höheren Betriebsdruck in allen MGT-Komponenten und der Erhöhung des Arbeitsmittelmassenstroms bei unveränderter Turbineneintrittstemperatur gegenüber dem Referenzprozess. Eine Veränderung der thermischen Betriebsbedingungen kann zu einer veränderten mechanischen Beanspruchung der MGT-Bauteile und einer Beeinflussung der Lebensdauer führen. Diese stellt neben den Leistungsdaten eine weitere wichtige Bewertungsgröße der Energieanlage dar.

Um den Einfluss der Turboaufladung auf die Lebensdauer der MGT abzuschätzen, wurde exemplarisch die Untersuchung des Verdichterlaufrades (Abbildung 7) als hochbeanspruchtes Bauteil ausgewählt. Basis für eine strukturmechanische FEM-Simulation sind die Strömungsverhältnisse (insbes. der dreidimensionale Druckverlauf entlang des Laufrades), die aus einer CFD-Simulation ermittelt wurden.

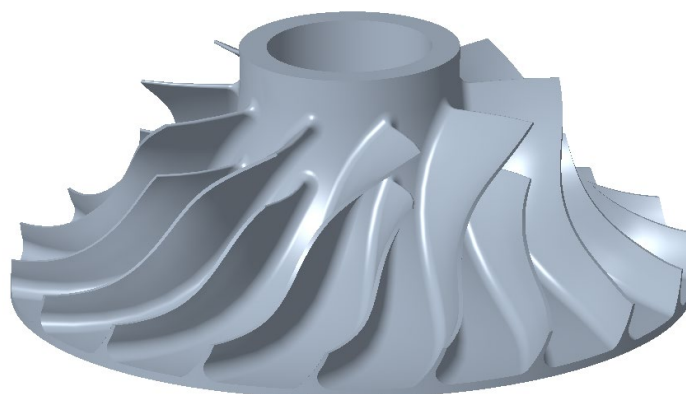


Abbildung 7: CAE Model des C30 Verdichterlaufrads

Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen dem Standardbetrieb und aufgeladenen Betrieb der MGT wurden Betriebspunkte der Drehzahl  $n = 80.000 \text{ U/min}$  bei der Turbineneintrittstemperatur  $TET = 860^\circ\text{C}$  simuliert. Die notwendigen Randbedingungen für die CFD-Modelle (Drücke, Temperaturen, Massenströme) des Verdichterlaufrads wurden den eindimensionalen Simulationsergebnissen der Epsilon-Modelle aus Abbildung 8 (roter Kontrollraum) entnommen.

Das aus den CFD-Simulationen generierte Druck- und Temperaturfeld wurde als Randbedingung auf die FEM-Simulation interpoliert. Dabei wurde die Rotation des berücksichtigt. Die umfangreiche Vorgehensweise der Simulationen wurde in den Zwischenberichten dokumentiert.

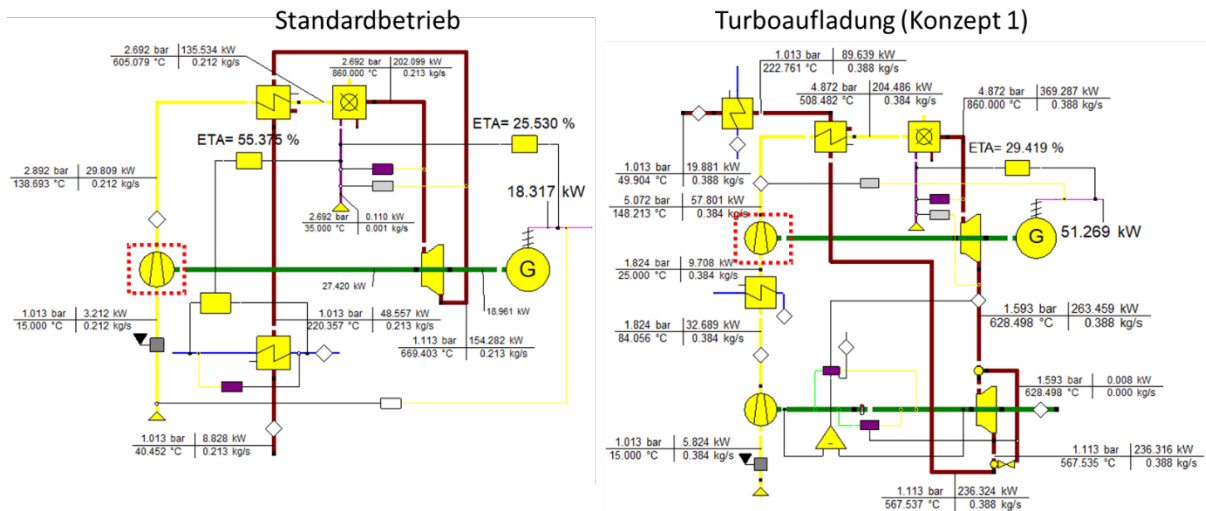


Abbildung 8: Randbedingungen für die CFD-Simulationen

### Ergebnisse der FEM-Analyse

Abbildung 9 zeigt die von Mises Vergleichsspannung aus den FEM Simulationen für den Standardprozess und Aufladungsvariante 1. Hierbei wurden neben den Druckfeldern aus der CFD, die Fliehkraft durch die Rotation und der Temperaturverlauf beachtet. Die detaillierten Ergebnisse der CFD-Simulationen sind in den Zwischenberichten dokumentiert.

Es ist zu erkennen, dass die größte Vergleichsspannung (bis zu 270MPa) jeweils an den Kanten der Laufradrückseite und -nabe auftreten. Dies ist zum einem durch die Kerbwirkung der Kanten (vereinfachte Geometrie) und zum anderen durch die gewählte Fixierung in der Simulation zu begründen. Aussagekräftige Ergebnisse werden dagegen an den Schaufeln des Laufrades erreicht. Die auftretenden Spannungen liegen hierbei in einem Bereich von ca. 50-150 MPa und unterscheiden sich kaum zwischen den beiden Prozessvarianten.

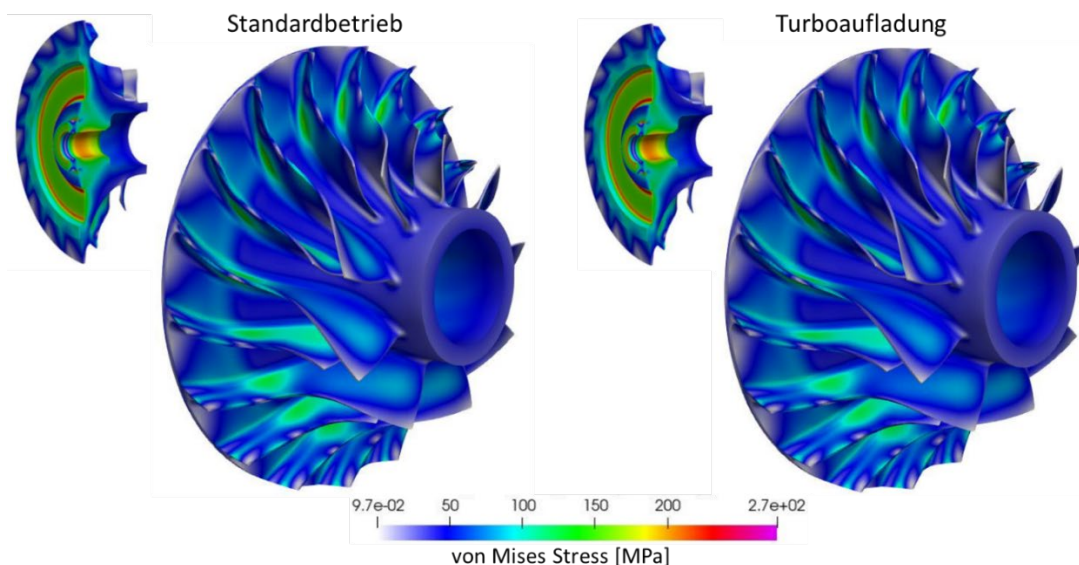


Abbildung 9: Vergleichsspannungen im Verdichterlaufrad



Zum besseren Vergleich der beiden Prozessvarianten wurden die FEM-Ergebnisse als Spannungsdifferenz ( $\sigma_{\text{Turbo}} - \sigma_{\text{Standard}}$ ) knotenweise gegenübergestellt. Die Verteilung dieser Spannungsdifferenz wird in Abbildung 10 veranschaulicht. Es ist ersichtlich, dass in einem Großteil der Laufradstruktur (grauer Bereich) die auftretende Spannung gegenüber dem Standardbetrieb geringfügig abnimmt. Die maximale Spannungserhöhung durch die Turboaufladung beträgt ca. 10 MPa und tritt in den Schaufelvorderkanten des Laufrades auf.

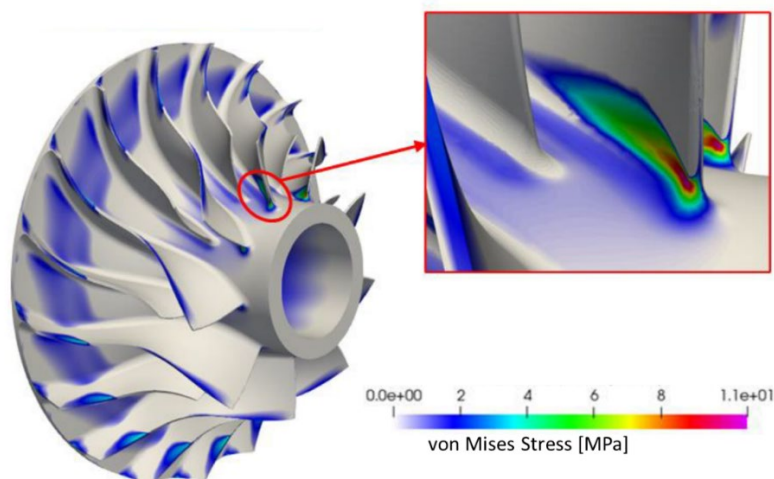


Abbildung 10: Differenz der Vergleichsspannungen

Die geringe Spannungsänderung durch die Turboaufladung lässt den Rückschluss zu, dass die mechanische Beanspruchung unwesentlich beeinflusst wird. Eine mögliche Begründung hierfür ist, dass die höheren Druckspannungen durch die Turboaufladung der Fliehkraftbeanspruchung entgegenwirken. Daher wird der Einfluss der Turboaufladung auf die Bauteillebensdauer des Verdichterrades als gering eingeschätzt. Die Lebensdauer der anderen Bauteile (Brennkammer, Rotor und Turbinenlaufrad) und der Gesamtmaschine müssten für genauere Aussagen weiter untersucht werden.

## 2.2 AP 3.2 Experimentelle Validierung der Prozessmodelle (ersetzt durch simulative Fehlerabschätzung)

Zur Validierung der Simulationsergebnisse sollte der C30 Mikrogasturbinenprüfstand der Hochschule herangezogen werden. Die Turbine wird mit Erdgas aus dem öffentlichen Netz betrieben, welches über einen externen Vorverdichter auf den Brennkammerdruck vorverdichtet wird. Da mit der bestehenden externen Vorverdichtung die Drücke für den Aufladungsbetrieb nicht erzielt werden können, ist eine entsprechende Umrüstung erforderlich. Ein kompletter Austausch des Vorverdichters wäre jedoch kostenmässig unverhältnismässig hoch. Daher wurde ein Konzept für eine externe Gasversorgung erarbeitet, welches über Gasflaschen den nötigen Betriebsdruck bereitstellen sollte (siehe Zwischenberichte 4 und 5). Für die Umsetzung wurden Angebote zur neuen Gasversorgung, zur Heizung der Gasversorgung und zur Umprogrammierung der Capstone C30 eingeholt. Allerdings konnte die Umsetzung dieses



Vorhabens im bestehenden Zeitrahmen nicht mehr abgeschlossen werden, unter anderem durch ausstehende behördliche Abklärungen und Freigabe des Umbaus.

Da damit bedingt auch die geplanten Versuchsreihen im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr umgesetzt werden konnten, ist die experimentelle Validierung der Simulationsmodelle ausstehend geblieben.

Um den Modellierungsfehler dennoch eingrenzen zu können, wurde ersatzweise auf Basis einer Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Einflussparameter eine Fehlerabschätzung durchgeführt (siehe auch Zwischenbericht 6).

Dazu wurde das aufgeladene Basismodell aus den Vorstudien im Auslegungspunkt betrachtet. Die größten Einflussgrößen, welche sich nicht aus den Umgebungsbedingungen oder Einstellungen an der Mikrogasturbine (z.B. die Turbineneintrittstemperatur oder -druck) ableiten, wurden variiert, um die Auswirkung auf die Ergebnisgrößen (elektrischer Wirkungsgrad, elektrische Leistung, thermischer Wirkungsgrad) zu erkennen.

Abbildung 11 zeigt das Basismodell mit den erzielten Prozessleistungsdaten sowie den Wirkungsgraden der Prozesskomponenten (isentropen Wirkungsgrade von MGT-Verdichter, MGT-Turbine, TL-Verdichter, TL-Turbine, Effizienz Rekuperator).

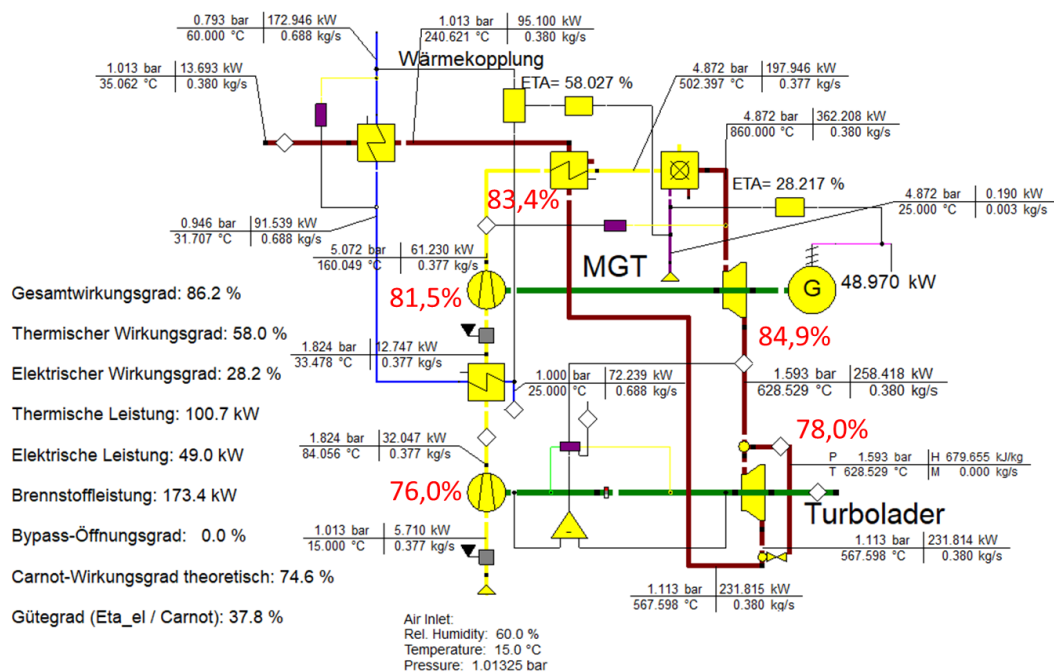


Abbildung 11: Simulationsergebnisse Auslegungspunkt mit markierten Haupteinflussgrößen

Für die Sensitivitätsanalyse wurden die Komponentenwirkungsgrade um jeweils +/-5%-Punkte variiert und der resultierende elektrische Wirkungsgrad und die elektrische Leistung berechnet. Gemäß Abbildung 12 zeigt sich, dass der isentrope Komponentenwirkungsgrad der Turbine der MGT den größten Einfluss auf die Leistungsdaten (elektrische Leistung und elektrischer Wirkungsgrad) des Prozesses hat. Danach folgen in absteigender Reihenfolge der isentrope Wirkungsgrad des MGT-Verdichters, der Wirkungsgrad des Rekuperators, der isentrope Wirkungsgrad des TL-Verdichters und der isentrope Wirkungsgrad der TL-Turbine. Der thermische Wirkungsgrad verhält sich entgegengesetzt zum elektrischen Wirkungsgrad. Dieser



profitiert von niedrigeren Komponentenwerten und ist am stärksten von der Rekuperatoreffizienz und dem isentropen Wirkungsgrad der MGT-Turbine abhängig.

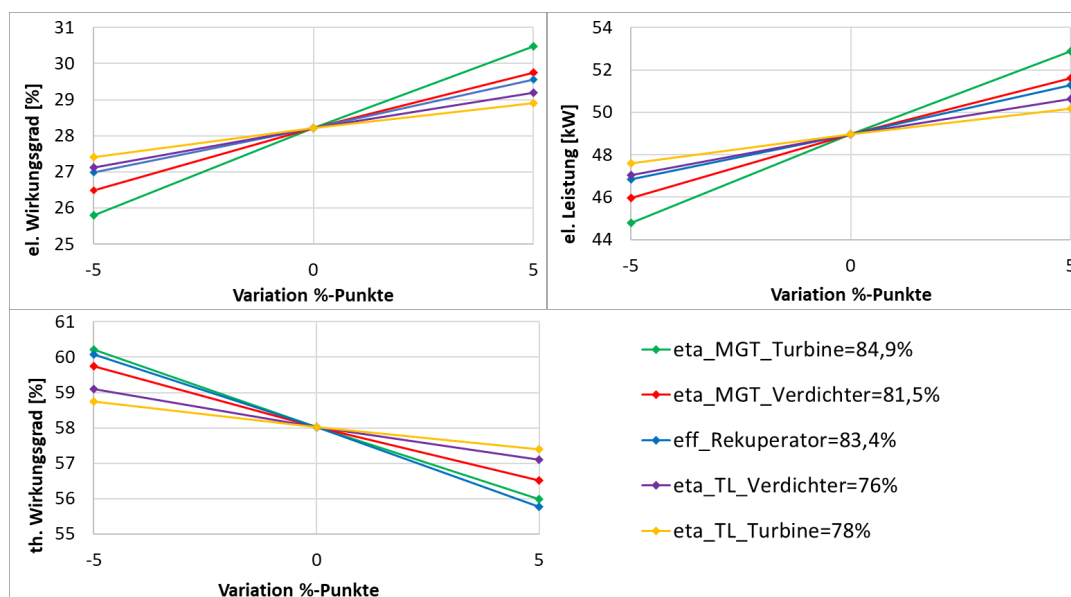


Abbildung 12: Sensitivitätsanalyse der Haupteinflussgrößen

Um den Gesamtfehler im Modell bei ungünstigen Abweichungen der Einflussgrößen im Zusammenwirken der Komponenten zu bestimmen, wurden in einer weiteren Sensitivität die fünf Einflussgrößen gleichzeitig schrittweise angepasst. Die Ergebnisse sind in den Fehlerbändern in Abbildung 13 dargestellt. Hierin werden drei Bereiche unterschieden. Der wahrscheinlichste Sensitivitätsbereich der Einflussgrößen liegt zwischen +1% und -1%, hier variieren die Leistungsdaten am geringsten. Der elektrische Wirkungsgrad ist in einem Band von 29,6% und 26,8% zu erwarten. Bei ungünstiger starker Abweichung der Einflussgrößen um bis zu -2%-Punkte sinkt der elektrische Gesamtwirkungsgrad auf 25,4% ab. Bei sehr großer und eher unwahrscheinlicher Abweichung um -5%-Punkte sinkt er auf bis zu 21,1%. Aus dem Fehlerband der elektrischen Leistung lassen sich gleichermaßen die entsprechenden Verschiebungen ablesen.

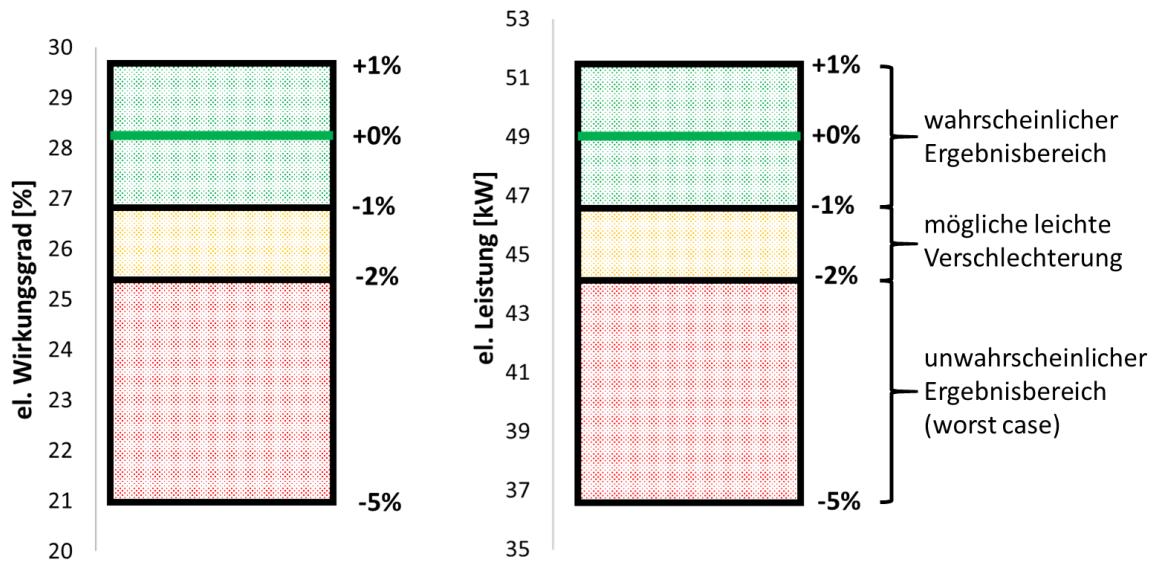


Abbildung 13: Fehlerbänder bei Abweichung der Haupteinflussgrößen

Aus den Sensitivitäten lässt sich schlussfolgern, dass das Fehlerband des prognostizierten elektrischen Wirkungsgrads der Mikrogasturbinenaufladung von 28,2% in einem Bereich von +/- 1,4% und das der prognostizierten elektrischen Leistung von 49kW in einem Bereich von +/- 2,4kW zu erwarten ist. Darüber hinaus ist bei der Auswahl eines geeigneten Turboladers insbes. auf den Wirkungsgrad des TL-Verdichters zu achten.

## 2.3 AP 3.3 Dimensionierung des MGT-Prozesses für Pilotanlage

Die Dimensionierung des aufgeladenen MGT-Prozesses für eine Pilotanlage erfolgt abhängig von der aus dem Methanisierungsprozess gewonnenen Kraftstoffmenge, die in der MGT verbrannt werden soll. Für die Pilotanlage wurde eine auf 100.000 Einwohner ausgelegte Kläranlagengröße herangezogen. Es wurde ein Skalierungstool entwickelt, welches zur Dimensionierung unterschiedlicher Prozessvarianten des Kläranlagenbetriebs (Standard Kläranlagenprozess; Vergasung, Methanisierung mit Luft; Vergasung, Methanisierung mit Dampf + O<sub>2</sub>; Vergasung ohne Methanisierung; siehe auch Abschnitt 4.4) eingesetzt werden konnte. Die Prozessgrößen der skalierten MGT sind wiederum Eingabegröße in die Vernetzung der Teilsysteme zum Gesamtsystem, s.a. Kapitel 4.4.

Zudem wurde der aufgeladene Mikrogasturbinenprozess als KWK-Variante für die Pilotanlage der einer einfachen Mikrogasturbine und eines Gasmotors gegenübergestellt (siehe auch Zwischenbericht 6 für detaillierte Ausführungen).

### 2.3.1 Skalierungstool des aufgeladenen MGT-Prozesses

Zur Skalierung des MGT-Prozesses auf beliebige Leistungsklassen wurde das Modell des aufgeladenen C30-Prozesses aus den Vorstudien in Arbeitspaket 3.1 erweitert und modifiziert. Entsprechend des geforderten elektrischen Leistungsbereichs von mehreren hundert kW für eine Pilotanlage wurden die Charakteristiken einer Capstone C200 in das Epsilon-Modell



integriert, welche aufgrund verbesserter Komponenteneigenschaften (wie etwa Teilwirkungsgrade von Verdichter, Turbine und Rekuperator) die Effizienz des gesamten MGT-Prozesses begünstigen. Die Turbineneintrittstemperatur von  $860^{\circ}\text{C}$  aus dem C30-Grundmodell wurde auf  $900^{\circ}\text{C}$  gemäß der C200 Betriebstemperatur erhöht. Im Skalierungstool wird das MGT-System im Auslegungspunkt betrachtet. Dazu werden im Modell die Designpunkteigenschaften des C30-Basismodells bei der Betriebsdrehzahl  $n=80.000$  übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass auch das skalierte MGT-System in diesem Punkt sein Optimum hat.

In Abbildung 14 ist der Skalierungsprozess komprimiert dargestellt. Es bestehen zwei verschiedene Herangehensweisen. Zur Anpassung der Leistungsklasse kann im Modell entweder die gewünschte elektrische Leistung für den Kläranlagenprozess als regelbare Zielgröße oder der verfügbare Kraftstoffmassenstrom aus der Vergasung (und gegebenenfalls der Brennstoffheizwert) angepasst werden. Außerdem ist zusätzlich eine Wärmestromregelung möglich, welche im nächsten Abschnitt erläutert wird.

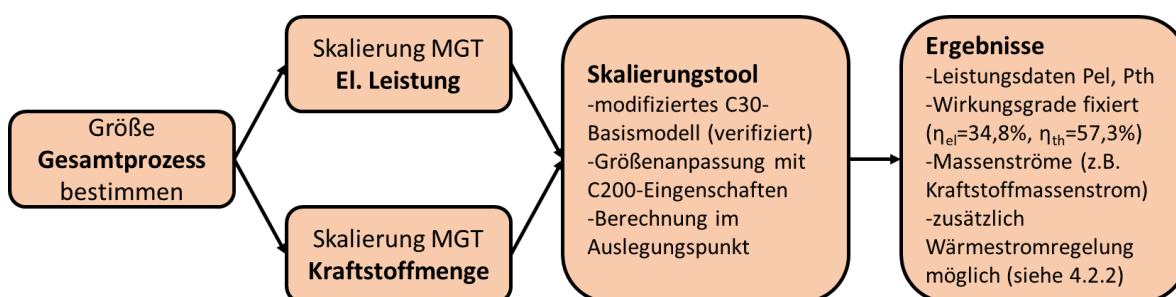


Abbildung 14: Skalierungsprozess des aufgeladenen MGT-Prozesses

### 2.3.2 Skalierung des MGT-Prozesses für verschiedene Gesamtprozessvarianten

Abbildung 15 zeigt exemplarisch den skalierten MGT-Prozess für Variante 3 des Gesamtprozesses, bei der für die Methanisierung Dampf und Sauerstoff bereitgestellt wird (siehe auch Abschnitt 4.4). Die Wirkungsgrade erreichen im Designpunkt die Werte  $\eta_{el} = 34,8\%$  und  $\eta_{th} = 57,3\%$ , der Gesamtwirkungsgrad erzielt einen Wert von  $92\%$ . Elektrischer und Gesamtwirkungsgrad übersteigen erwartungsgemäß die Werte des aufgeladenen C30 Mikrogasturbinenprozess. Weitere Ergebnisse, wie Leistungswerte ( $P_{el}$ ;  $P_{th}$ ), Massenströme oder Drücke können direkt im Modell abgelesen werden.

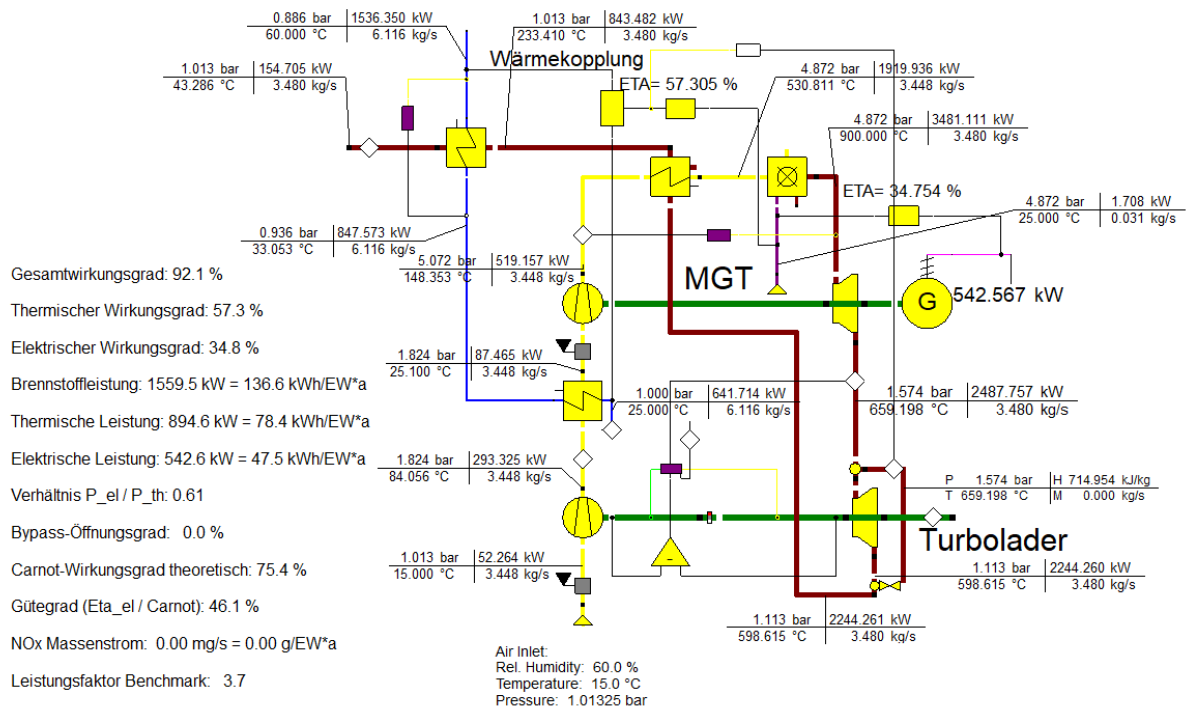


Abbildung 15: Skalierter MGT-Prozess (Variante: Methanisierung mit Dampf + Sauerstoff)

Analog zur Prozessvariante 3 erfolgte die Skalierung der anderen Varianten des Kläranlagenprozesses.

Die Leistungsdaten aller skalierten Prozessvarianten sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Der Vergleich zeigt, dass sich durch die Vergasung und Methanisierung deutlich mehr Brennstoff als beim herkömmlichen Kläranlagenprozess herstellen lässt. Bei der Prozessvariante 3 kann die Brennstoffleistung  $P_{Br}$  gegenüber dem Standardbetrieb sogar mehr als verdreifacht werden. Es sei jedoch auf den jeweiligen Prozessaufwand der einzelnen Varianten hingewiesen. Eine genauere Analyse davon findet sich im Abschnitt 4.4.

Prozessvariante	Brennstoffleistung [kW]	el. Leistung [kW]	th. Leistung [kW]
1 Standardprozess	424,1	147,6	243,3
2 Vergasung, Methanisierung Luft	1218,3	423,9	698,9
3 Vergasung, Methanisierung Dampf O2	1559,5	542,6	894,6
4 Vergasung ohne Methanisierung	918,1	319,4	526,7

Tabelle 3: Leistungsdaten der dimensionierten MGT-Anlagen für verschiedene Prozessvarianten

Die Tabelle ermöglicht eine schnelle Abschätzung der MGT-Anlagengröße für die verschiedenen Varianten des Gesamtprozesses.



Neben der elektrischen Leistung und der Kraftstoffmenge besteht im Simulationsmodell die Möglichkeit, den Wärmestrom zu regeln. Hierbei kann bei Bedarf die thermische Leistung im begrenzten Rahmen zu Lasten der elektrischen Leistung über den Turbolader-Bypass erhöht werden. Wird dieser teilgeöffnet, strömt mehr heißes Abgas am Turbolader vorbei, der als zusätzlicher Wärmestrom genutzt werden kann. Diese Option kann für den skalierten Prozess genutzt werden, falls der benötigte Wärmestrom zu niedrig ist. In Abbildung 16 wird exemplarisch eine Simulation dargestellt, bei welcher der Turbolader-Bypass um 45% geöffnet ist. Dadurch wird die verfügbare Wärmeleistung auf 1050kW erhöht bei einer Minderung der elektrischen Leistung auf 378,4kW (zuvor  $P_{th} = 894,6\text{kW}$ ;  $P_{el} = 542,6\text{kW}$ , siehe Abbildung 15).

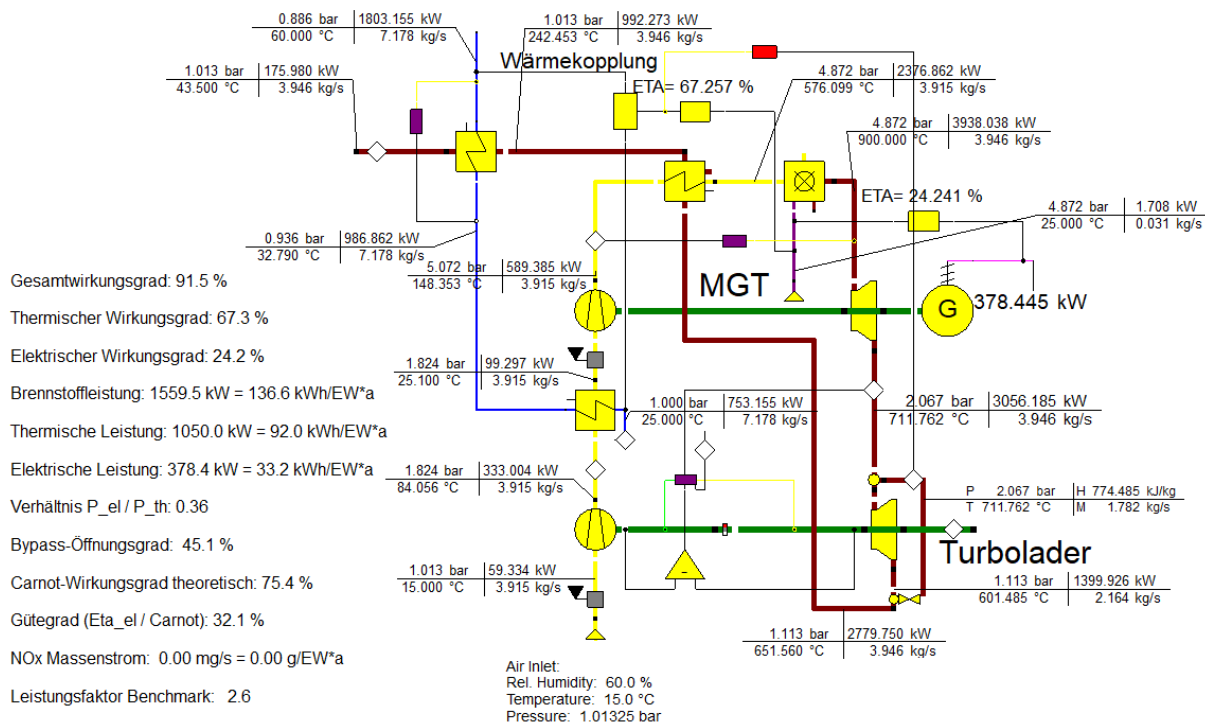


Abbildung 16: Beispielergebnis: Wärmeregulierung über TL-Bypass

Abbildung 17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Bypass-Öffnungsgrad und den sich einstellenden elektrischen und thermischen Leistungen. Die verfügbare Kraftstoffleistung wird über den Simulationspunkten entsprechend der in Gesamtprozessvariante 3 zu  $P_{Br} = 1559,5 \text{ kW}$  festgesetzt. Es ist zu erkennen, dass durch Teilöffnen des Bypasses die thermische Leistung nahezu vollständig um die elektrische Leistung erhöht werden kann. Ab einem Öffnungsgrad von 66% kann der Turbolader-Verdichter nicht mehr ausreichend angetrieben werden, d.h. die Grenze dieser Regelung wird erreicht.

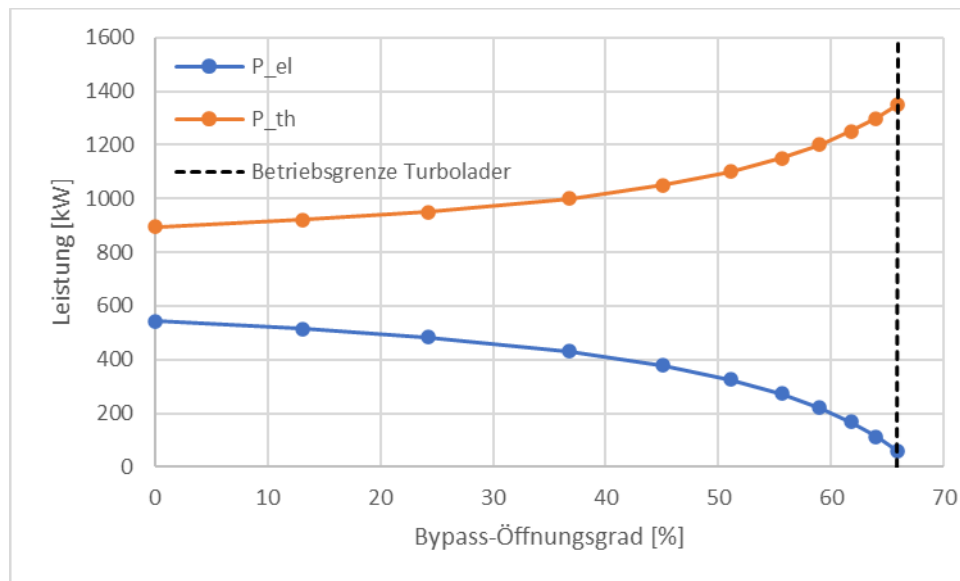


Abbildung 17: Elektrische und thermische Leistung in Abhängigkeit vom Turbolader-Bypass

In den meisten Fällen zielt ein Kraft-Wärme-Kopplungs-System auf einen möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad ab. Falls aber z.B. der Vergasungsprozess für die Vortrocknung des Klärschlammes einen erhöhten Wärmebedarf einfordert, kann diese Wärmeregulierung flexibel ausgeführt werden.

### 2.3.3 Vergleich zwischen einer einfachen MGT, einer aufgeladenen MGT und eines Gasmotors

Zur energetischen Beurteilung des skalierten aufgeladenen C200-MGT-Systems wird dieses in einer Bewertungsmatrix den alternativen Kraft-Wärme-Kopplungssystemen einfache Mikrogasturbine und Gasmotor gegenübergestellt. Hierbei werden die Maschinen hinsichtlich der Kriterien Performance, Teillast + KWK-Betriebsflexibilität, Kraftstoffflexibilität, Emissionen sowie Kosten / Nutzen von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) verglichen. Als einfache Gasturbine wird die Capstone C200 und als Beispielgasmotor der MAN E3268 LE 232 (Sondergas) herangezogen. Die Bewertung erfolgt soweit möglich mit quantifizierbaren Größen, welche aus Recherchen, Modellierungen und Schätzungen abgeleitet wurden. Die Bewertungskriterien wurden dabei nicht gewichtet.

#### Einfache Mikrogasturbine (Capstone C200)

Tabelle 4 zeigt die Bewertung für den einfachen MGT-Prozess anhand einer Capstone C200. Ein Großteil der Bewertungsdaten konnte aus den Datenblättern der MGT übernommen werden. Die wesentlichen Vorteile der einfachen MGT sind eine sehr hohe Kraftstoffflexibilität und sehr geringe Emissionen. Nachteilig sind die vergleichsweise schlechte Performance (niedriger Wirkungsgrad) und hohe Kosten (insbes. durch die Erstinvestition).



Kriterien (Unterkriterien)	Bewertung (Quantifizierung, Begründung Unterkriterium)
<b>Performance</b> elektrische Leistung elektrischer Wirkungsgrad KWK-Wirkungsgrad	<b>2</b> $P_{el} = 200 \text{ kW}$ $\eta_{el} = 33\%$ 81% (gemäß C200 Datenblatt) <a href="https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter">https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter</a>
<b>Teillast + KWK-Flexibilität</b> Wirkungsgrad Teillastverhalten Spanne $P_{el}$ min. max.  Varianz Strom / Wärme	<b>3</b> bei 10% $P_{max} \rightarrow \eta_{el} = 10\%$ (von C30 abgeleitet); bei 50% $P_{max} \rightarrow \eta_{el} = 25\%$ (von C30 abgeleitet) 2-30kW bei C30 $\rightarrow$ ca. 10 - 200kW bei C200 Fest gekoppelt $\rightarrow$ keine Varianz; $\eta_{ges} = 81\%$
<b>Kraftstoffflexibilität</b> Arbeitsbereich Methan Brennstoff Heizwert Kraftstoffe	<b>5</b> 36 - 100 % 9,2-14,5kWh/m <sup>3</sup> (Erdgasvariante C200); 5,7 - 9,1kWh/m <sup>3</sup> Faulgas, Klärgas, Erdgas, Flüssigbrennstoffe (spezielle Varianten je Anwendung) <a href="https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gasturbinen/2021/broschueren/ASUE-Broschuere_Mikrogasturbinen_2021.pdf">https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gasturbinen/2021/broschueren/ASUE-Broschuere_Mikrogasturbinen_2021.pdf</a>
<b>Emissionen</b> NO <sub>x</sub> Emissionen Lärm Emissionen	<b>5</b> 18 mg/m <sup>3</sup> 66 dBA (gemäß C200 Datenblatt) <a href="https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter">https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter</a>
<b>Kosten / Nutzen</b> Investition netto Wartung Nutzungsdauer Gesamtkosten / Jahr Gesamtkosten / Jahr und Leistung	<b>2</b> 443.000 € 12.250 €/a 10 a 58.396 €/a 292 €/a*kW <a href="https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/wirtschaftlichkeit">https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/wirtschaftlichkeit</a>
<b>Summe</b>	<b>17</b>

Tabelle 4: Bewertung einfache Mikrogasturbine

### Aufgeladene Mikrogasturbine (Capstone C200 + Turbolader)

Tabelle 5 veranschaulicht die Bewertung des aufgeladenen MGT-Prozesses mit einer Capstone C200. Hierin wurden Recherchewerte mit Erkenntnissen aus den Simulationen und Schätzwerten (für Emissionen und Kosten) ergänzt. Durch die Aufladung der MGT steigert sich vor allem die Performance und das Teillastverhalten sowie die KWK-Flexibilität (Möglichkeit zur Wärmeregulung über Turbolader-Bypass) im Vergleich zum einfachen Prozess.



Kriterien (Unterkriterien)	Bewertung (Quantifizierung, Begründung Unterkriterium)
<b>Performance</b> elektrischer Leistung elektrischer Wirkungsgrad KWK-Wirkungsgrad	<b>3</b> Max. 350 - 400 kW $\eta_{el} = 34\% - 36\%$ (aus Epsilon-Simulation) 90% (aus Epsilon-Simulation)
<b>Teillast + KWK-Flexibilität</b> Wirkungsgrad Teillastverhalten Spanne $P_{el}$ min. max. Varianz Strom / Wärme	<b>5</b> Teillast wird durch Abschalten des TL verbessert; z.B. bei 50% $P_{max} \rightarrow \eta_{el} = 33\%$ (entspricht dann $\eta_{el}$ der einfachen C200) Verdopplung gegenüber einfacher MGT (10-400kW) Regelung durch TL-Bypass (Erhöhung $\eta_{th}$ zulasten $\eta_{el}$ )
<b>Kraftstoffflexibilität</b> Arbeitsbereich Methan Brennstoff Heizwert Kraftstoffe	<b>4</b> 36 - 100 % 9,2-14,5kWh/m <sup>3</sup> (Erdgasvariante C200); 5,7 - 9,1kWh/m <sup>3</sup> Faulgas, Klärgas, Erdgas, Flüssigbrennstoffe (wie C200, mögliche Probleme mit Turbolader bei Schwefel)
<b>Emissionen</b> NO <sub>x</sub> Emissionen Lärm Emissionen	<b>4</b> Emissionen nicht genau bekannt, mäßige Erhöhung gegenüber Standardprozess möglich >66 dBA (leichte Erhöhung durch TL zu erwarten) <a href="https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter">https://www.microturbine.de/de/gasturbinen/datenblaetter</a>
<b>Kosten / Nutzen</b> Investition netto Wartung Nutzungsdauer Gesamtkosten / Jahr Gesamtkosten / Jahr und Leistung	<b>3</b> 600.000 € geschätzt (MGT + TL + Umbau) 15.000 €/a 8 a geschätzt, leichte Lebensdauereinbuße 90.000 €/a 225 €/a*kW (gerechnet mit 350kW)
<b>Summe</b>	<b>19</b>

Tabelle 5: Bewertung aufgeladene Mikrogasturbine

### Gasmotor (MAN E3268 LE 232 Sondergas)

Schlussendlich wird in Tabelle 6 die Bewertung des Gasmotors zusammengefasst. Wesentliche Vorteile der motorischen Kraftwärme-Kopplung (als klassisches BHKW) sind der hohe Wirkungsgrad und damit verbunden eine sehr gute Performance. Zudem sind die Kosten vergleichsweise gering (insbes. die Investitionen). Demgegenüber sind Nachteile des Gasmotors eine geringere Kraftstoffflexibilität, sowie hohe Abgas- und Lärmemissionen.



Kriterien (Unterkriterien)	Bewertung (Quantifizierung, Begründung Unterkriterium)
<b>Performance</b> Mech. Leistung Mech. Wirkungsgrad KWK-Wirkungsgrad	<b>5</b> $P_{\text{mech}}=370 \text{ kW}$ (Achtung hier mech. Leistung aus Datenblatt) $\eta_{\text{mech}}=40\%$ 90% (gemäß Datenblatt) <a href="https://www.man.eu/ntg_media/media/de/content_medien/doc/man_engines_1/produkte/power_1/MAN-Engines-Power-Energieerzeuger-Gas-Broschuere.pdf">https://www.man.eu/ntg_media/media/de/content_medien/doc/man_engines_1/produkte/power_1/MAN-Engines-Power-Energieerzeuger-Gas-Broschuere.pdf</a>
<b>Teillast + KWK-Flexibilität</b> Wirkungsgrad Teillastverhalten Spanne $P_{\text{mech}}$ min. max. Varianz Strom / Wärme	<b>3</b> bei 50% $P_{\text{max}} \rightarrow \eta_{\text{mech}}=38\%$ ca. 10%-100% weitestgehend fest, je nach Motor größerer Spielraum, Verschlechterung der Emissionswerte <a href="https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf">https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf</a>
<b>Kraftstoffflexibilität</b> Arbeitsbereich Methan Brennstoff Heizwert Kraftstoffe	<b>2</b> ca. 50 - 100 % nicht bekannt Sondergas, Erdgas, Methanzahl >100 <a href="https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf">https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf</a>
<b>Emissionen</b> NO <sub>x</sub> Emissionen Lärm Emissionen	<b>2</b> < 500 mg/m <sup>3</sup> 108 dBA <a href="https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf">https://bhkw-shop.de/media/files/1712_e3268le232_m18_de.pdf</a>
<b>Kosten / Nutzen</b> Investition netto Wartung Nutzungsdauer Gesamtkosten / Jahr Gesamtkosten / Jahr und Leistung	<b>5</b> 203.500 € (ca. 550 €/kW) 20.000 €/a 103 a 36.280 €/a 181 €/a*kW <a href="https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten">https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten</a>
<b>Summe</b>	<b>17</b>

Tabelle 6: Bewertung Gasmotor

### Gesamtwertung im Vergleich

In der Gesamtwertung liegt das untersuchte aufgeladene MGT-System mit 19 Punkten gemäß Tabelle 7 knapp vor der einfachen MGT und dem Gasmotor (je 17 Punkte). Dies zeigt, dass der aufgeladene MGT-Prozess eine Verbesserung gegenüber den etablierten KWK-Anlagen darstellen kann, sofern die technische Umsetzung weiterverfolgt und ermöglicht wird. Die einfache MGT und der Gasmotor haben in dieser Bewertung die gleiche Punktzahl erzielt. Je nach Anwendungsfall kann eine der Varianten Vorteile aufweisen.



Kriterium \ Variante	MGT	MGT + TL	Motor
<b>Performance</b>	2	3	5
<b>Teillast + KWK-Flexibilität</b>	3	5	3
<b>Kraftstoffflexibilität</b>	5	4	2
<b>Emissionen</b>	5	4	2
<b>Kosten / Nutzen</b>	2	3	5
<b>Summe</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>17</b>

Tabelle 7: Vergleichende Gesamtwertung MGT, aufgeladene MGT und Gasmotor

Angemerkt sei hierbei, dass die Bewertung nach bestem Wissen vorgenommen wurde. Dennoch könnten sich je nach Betrachtung, Gewichtung (hier ungewichtet) und Ausführung der Maschine andere Tendenzen ergeben.

## 2.4 Vernetzung aller Teilsysteme in den Gesamtprozess (AP 3.4)

In diesem Kapitel werden nochmals die verschiedenen Gesamtprozessvarianten beschrieben und die Energie- und Massenströme zwischen den Teilprozessschritten sowie die wichtigsten Ergebnisgrößen verglichen (im Detail auch in den Zwischenberichten 5 und 6 dokumentiert). Die Werte basieren auf den Auswertungen der Epsilon-Simulationen und der Ökoeffizienzanalyse aus Arbeitspaket 4.

### 2.4.1 Varianten des Eco-PIK Prozesses (Prozessbeschreibung)

Es wurden vier Prozessvarianten hinsichtlich des Vergasungsvorgangs und der Anbindung des aufgeladenen MGT-Prozesses an die Klärschlammvergasung unterschieden, welche als Schaltbilder im Anhang A hinterlegt sind.

#### Variante 1: Standard Kläranlagenprozess

Der standardmäßige Kläranlagenprozess mit Faulung ohne Vergasung ist in Abbildung 18 Anhang A dargestellt. Dieser umfasst den normalen Kläranlagenprozess mit Vorklärung, Belebung und Nachklärung, die aerobe Vergärung im Faulturm, sowie die Verbrennung des Faulgases in einem BHKW oder einer MGT. Außerdem wird der Faulschlamm entwässert, abtransportiert und zentral in einer Monoverbrennungsanlage verwertet.

Der Standardprozess dient zum Vergleich mit den weiteren Prozessvarianten mit Vergasung und Methanisierung. Im Fall einer 100.000 EW Anlage würde der Standardprozess eine Netowärmemenge von ca. 130 kW freisetzen, bedarf aber für den Klär- und Faulvorgang eine verbleibende Leistungszufuhr von ca. 80 kW.

#### Variante 2: Vergasung, Methanisierung mit Luft und Verstromung

In der zweiten betrachteten Variante wird der Kläranlagenprozess um mehrere Prozessschritte erweitert, s.a. Abbildung 19 Anhang A. Der Faulschlamm wird in dieser Prozessvariante entwässert, getrocknet, in Pellets gepresst und anschliessend in einem Vergaser unter Luftzufuhr



zu Synthesegas gewandelt. Das entstehende Synthesegas wird dann in den Faulturm zurückgeführt. Im Faulturm erfolgt die Methanisierung. Dazu wird Wasserstoff benötigt, um das methanarme Gasgemisch aus Synthese- und Faulgas mit Methan anzureichern.

Im Unterschied zur nachfolgenden Variante 3 wird bei der Vergasung Luft verwendet. Durch den Stickstoffanteil in der Luft entsteht letztendlich mehr Synthesegas, welches den Stickstoffanteil beibehält. Dies spiegelt sich auch im Methananteil des finalen Gasgemisches wider mit  $x_{CH_4} = 0,56$  (56% Methan).

Im Fall einer 100.000 EW Anlage würde Prozessvariante 2 eine Nettowärmemenge von ca. 72 kW freisetzen und bedarf für den Klär- und Faulvorgang, die Trocknung, Pelletierung und Vergasung eine verbleibende Leistungszufuhr von ca. 1,3 MW.

### **Variante 3: Vergasung, Methanisierung mit Dampf + O<sub>2</sub> und Verstromung**

Der Aufbau von Prozessvariante 3 gemäß Abbildung 20 Anhang A entspricht dem Aufbau Variante 2. Die Vergasung erfolgt hier jedoch mit Dampf und reinem Sauerstoff. Der Sauerstoff kann dabei aus der ohnehin für die Methanisierung notwendigen Wasserstoffproduktion herangezogen werden. Dadurch ist das entstehende Synthesegas frei von Stickstoff und es wird nahezu reines Methan generiert.

Insgesamt entsteht damit eine höhere Brennstoffqualität und auch eine höhere Brennstoffleistung. Zudem besteht die Möglichkeit, das produzierte Methan in das Erdgasnetz einzuspeisen, anstatt vor Ort zu verbrennen.

Die Energiebilanz fällt etwas günstiger aus, als bei Variante 2. Im Fall einer 100.000 EW Anlage würde Prozessvariante 3 eine Nettowärmemenge von ca. 200 kW freisetzen und für den Klär- und Faulvorgang, die Trocknung, Pelletierung und Vergasung eine zusätzliche elektrische Leistung von ca. 1,1 MW benötigen.

### **Variante 4: Vergasung ohne Methanisierung und Verstromung**

Als weitere Variante 4 wurde der Prozess mit Vergasung, aber ohne Methanisierung gemäß Abbildung 21 Anhang A betrachtet. In dieser Variante wird wie bei der Variante 2 der Klärschlamm mit Luft vergast. Das entstehende Synthesegas wird in den Faulturm zurückgeführt und mit dem vorliegenden Faulgas gemischt. Auf einen Methanisierungsprozess wird in dieser Variante verzichtet.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Prozessvariante ist, dass kein zusätzlicher Wasserstoff für die Methanisierung benötigt wird und die energieintensive Hydrolyse entfällt. Dementsprechend fällt die Nettobilanz gegenüber den Varianten 2 und 3 günstiger aus. Das finale Gasgemisch aus Synthesegas und Faulgas hat jedoch eine schlechtere Gasqualität mit einem geschätzten Methananteil von  $x_{CH_4} = 0,35$ .

Im Fall einer 100.000 EW Anlage würde Prozessvariante 4 die Zufuhr von ca. 98 kW Wärmeenergie erfordern und eine elektrische Leistung von ca. 28 kW freigeben.

#### **2.4.2 Vergleich der Energiebilanzen der Eco-PIK Prozessvarianten**

In Tabelle 8 werden die Strombilanz, die Wärmebilanz und die Gesamtenergiebilanz (Strom + Wärme) der vier Prozessvarianten zusammengefasst gegenübergestellt. In diesem Vergleich wurde zudem der Strombedarf für die Wasserstoffproduktion herausgerechnet unter der Annahme, dass dieser vollständig durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden kann. Die Bilanzierungswerte beziehen sich entsprechend den Prozessdarstellungen in Anhang A in kWh pro Einwohnerwert und Jahr.



Variante \ Größe	Strom [kWh/EW*a]	Wärme [kWh/EW*a]	Gesamt [kWh/EW*a]
1 Standardprozess	-7,08	+11,34	+4,26
2 Vergasung, Methanisierung Luft	-113,28 (+11,52*)	+6,27	-107,01 (+17,79*)
3 Vergasung, Methanisierung Dampf O2	-92,84 (+31,96*)	+23,73	-69,11 (+55,69*)
4 Vergasung ohne Methanisierung	+2,49	-8,67	-6,18

Tabelle 8: Energiebilanzen der Gesamtprozessvarianten

(\* 124,8 kWh/EW\*a für die Wasserstoffherstellung herausgerechnet)

Es ist ersichtlich, dass der Standardprozess eine negative Strombilanz aufweist, d.h. den Eigenstrombedarf der Kläranlage nicht decken kann. Die freiwerdende Wärmemenge kann den internen Bedarf hingegen abdecken.

Die Varianten 2 und 3 erfordern einen hohen Strombedarf für die Herstellung des zur Methanproduktion benötigten Wasserstoffs (Abbildung 19 und Abbildung 20 Anhang A) und verzeichnen eine stark negative Strombilanz. Wird der Stromaufwand für die Methanisierung herausgerechnet, wenn dieser von der Anlage selbst (beispielsweise über Solarstrom) abgedeckt werden kann, ist ein Stromüberschuss erzielbar, der in das Stromnetz eingespeist werden kann. In beiden Varianten ist die Abwärme aus der KWK ausreichend, um für die hochenergetischen Teilprozesse Trocknung, Faulung, usw. die erforderliche Prozesswärme bereit zu stellen. Variante 3, die zur Methanisierung Dampf und Sauerstoff einsetzt, hat gegenüber der Methanisierung mit Luft die insgesamt bessere Energiebilanz.

Variante 4 mit Vergasung ohne Methanisierung hat eine positive Strombilanz, die erforderliche Wärme kann aber aus der KWK nicht ausreichend abgedeckt werden.

Unter der Voraussetzung, dass eigener Solarstrom zur Wasserstoffherstellung zur Verfügung steht, ist Variante 3 die interessanteste. Andernfalls schneidet der Standardprozess in der Gesamtbilanz am günstigsten ab.



## 2.5 Fazit und Ausblick zum Teilprojekt C

Im Teilprojekt C wurden umfassende Untersuchungen zu einem flexibilisierten Mikrogasturbinenprozess als KWK-Anwendung für Kläranlagen durchgeführt. Die Inhalte und wichtigsten Resultate der Arbeitspakete gemäß Abbildung 1 werden abschließend noch einmal zusammengefasst.

### AP 3.1: Vorstudien Prozessdesign

- Designstudien zum aufgeladenen MGT-Prozess
  1. Zielsetzung war die Erstellung thermodynamischer Konzeptmodelle zur Aufladung einer Mikrogasturbine (mit einer Capstone C30 als Referenzmaschine), deren Verifizierung und Parametrisierung.
  2. Methodisch erfolgte eine Modellierung und Verifikation des einfachen MGT-Prozesses sowie die Erweiterung des Prozesses um eine Turboaufladung (zwei Prozesskonzepte) mit der kommerziellen Simulationssoftware Epsilon Professional.
  3. Hauptresultat ist eine Wirkungsgradsteigerung (über 3%-Punkte) und deutliche Leistungssteigerung (+180%) abhängig von der Prozessführung der Turboaufladung unter idealen Bedingungen.
  4. Voraussetzung für die praktische Umsetzung der Turboaufladung einer Gasturbine (im Vergleich zur Motoranwendung) ist die Verfügbarkeit eines Turboladers mit grosser Schluckfähigkeit dessen konstruktive Anbindung sich abhängig von der Ausführung der Gasturbine komplex gestalten kann.
- CFD- und FEM-Analyse des MGT-Verdichterlaufrades
  1. Zielsetzung war eine erste Abschätzung des Einflusses der Aufladung und damit verbundenen höheren Druckbelastung auf die Lebensdauer der MGT-Komponenten.
  2. Methodisch erfolgte eine kombinierte CFD/FEM-Simulation unter den Betriebsbedingungen der Turboaufladung für das Verdichterlaufrad als kritischstes Bauteil.
  3. Hauptresultat ist eine nur unwesentlich veränderte mechanische Beanspruchung gegenüber der im nicht aufgeladenen Betriebszustand.
  4. Voraussetzung für die Generalisierung der Aussage ist die Bewertung der Lebensdauer von MGT-Turbine, Rotor und Brennkammer im aufgeladenen Betriebszustand, welche ausstehend ist.

### AP 3.2: Experimentelle Validierung der Prozessmodelle

- Experimentelle Untersuchungen konnten in der Projektlaufzeit bedingt durch zeitliche Verzögerungen in arbeitssicherheitstechnischen Abklärungen nicht zum Abschluss gebracht werden. Ersatzweise wurden Sensitivitätsanalysen und Fehlerabschätzungen auf Basis der Simulationsmodelle durchgeführt.
  1. Zielsetzung war die Validierung der Simulationsmodelle.
  2. Methodisch erfolgten die Sensitivitätsanalysen durch Variation der Haupteinflussparameter zur Bestimmung eines Unsicherheitsbandes.
  3. Hauptresultat ist ein Unsicherheitsband in der Simulationsvorhersage im Auslegungspunkt für den elektrischen Wirkungsgrad von 28,2% ist +/- 1,4% und für



die elektrische Leistung von 49kW +/- 2,4kW. Höhere Abweichungen sind eher unwahrscheinlich.

4. Voraussetzung für die Zuverlässigkeit des Unsicherheitsbandes sind keine massiven Abweichungen von den Komponentencharakteristiken im Zusammenwirken der Turboaufladung.

### AP 3.3 Dimensionierung des MGT-Prozesses für eine Pilotanlage

— Erstellung eines Skalierungstools für den aufgeladenen MGT-Prozess

1. Zielsetzung war die Erstellung eines Tools zur Skalierung des aufgeladenen C30-MGT-Prozesses auf beliebige elektrische Leistungen oder verfügbare Kraftstoffmengen.
2. Methodisch erfolgte eine Anpassung der Bauteileigenschaften der Gasturbine und Integration unterschiedlicher Regelungskonzepte (elektrische Leistung, oder Kraftstoffmenge) in das Aufladungsmodell der C30.
3. Hauptresultat ist ein funktionsfähiges Tool, welches bei Anpassung der Zielgrößen plausible Resultate liefert.
4. Voraussetzung für die Vorgehensweise ist ein Transfer des Betriebspunktoptimums der aufgeladenen C30 MGT (optimale Drehzahl) auf die skalierte MGT.

— Skalierung des MGT-Prozesses für verschiedene Gesamtprozessvarianten

1. Zielsetzung war Skalierung des aufgeladenen C30 Modells an die Zielgrößen der verschiedenen Gesamtprozessvarianten.
2. Methodisch wurde im Skalierungstools die verfügbare Kraftstoffmenge der jeweiligen Gesamtprozessvariante eingestellt.
3. Hauptresultat ist die Prognose der elektrischen und thermischen Leistung des aufgeladenen MGT-Prozesses, wobei über den ATL-Bypass eine Regelung der thermischen Leistung möglich ist.
4. Voraussetzung für die Aussagefähigkeit der Simulationsmodelle ist auch hier, dass sich der optimale Betriebspunkt der skalierten MGT im Zusammenwirken mit den Komponenten der Kläranlage gegenüber dem Betriebsoptimum des aufgeladenen Standardprozesses nicht verschiebt.

— Vergleich zwischen einfacher MGT, aufgeladener MGT und Gasmotor für eine Pilotanlage

1. Zielsetzung war die Bewertung und der Vergleich der konkurrierenden KWK-Prozesse auf Motor- bzw. MGT-Basis mit der aufgeladenen MGT
2. Methodisch erfolgte eine ungewichtete Wertung verschiedener Kriterien (Performance, Teillast + KWK-Betriebsflexibilität, Kraftstoffflexibilität, Emissionen, Kosten / Nutzen)
3. Hauptresultat ist ein leichter Bewertungsvorsprung für den aufgeladenen MGT-Prozess.
4. Voraussetzung ist eine Gleichgewichtung aller herangezogenen Bewertungskriterien.



### AP 3.4 Vernetzung aller Teilsysteme in den Gesamtprozess

- Darstellung und Vergleich der Energiebilanzen der Gesamtprozessvarianten
  1. Zielsetzung war die Anpassung der Teilsysteme auf den Gesamtprozess.
  2. Methodisch wurden dazu die Fluidmassen- und Energieströme der Teilprozesse und der Gesamtprozessvarianten ermittelt und aufeinander abgeglichen.
  3. Hauptresultat ist eine vielversprechende Energiegesamtbilanz für die Prozessvariante, die eine Methanisierung mit Dampf und O<sub>2</sub> in der Klärschlammverwertung vorsieht.
  4. Voraussetzung für die Bewertung ist eine Abdeckung des Energieaufwands für die Wasserstoffproduktion aus grünem Eigenstrom.

Die Listung zeigt, dass Teilprojekt C gemäß der festgelegten Arbeitspakete weitestgehend abgeschlossen werden konnte. Ausstehend sind leider die Validierungsversuche aus AP 3.2. Zwar konnten im Projektzeitraum Anlagenkonzepte zur Bereitstellung eines ausreichend hohen Brenngasdruckes ausgearbeitet sowie ein Instrumentierungs- und Regelkonzept für die Turboaufladung erstellt, die Versuchsreihen aber aufgrund ausstehender behördlicher Freigaben seitens der Arbeitssicherheit nicht mehr im Zeitplan durchgeführt werden. Die stattdessen durchgeführten simulativen Fehlerabschätzungen ersetzen im Hinblick auf die Neuartigkeit des Prozesses und dem Zusammenwirken der Komponenten die Validierung der Simulationsdaten nicht vollumfassend.

Dennoch konnten aus Teilprojekt C eine Vielzahl an Erkenntnissen zu dem bisher noch weitestgehend unerforschten Aufladungsbetrieb einer Gasturbine gewonnen werden.

Für eine sichere Auswahl und Auslegung eines aufgeladenen Gasturbinenprozesses als KWK-Anlage müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden. Im Rahmen sich anschließender Forschungsarbeiten empfiehlt sich eine weiterführende Betrachtung der nachfolgenden Themenfelder:

- **Interaktion** der Strömungsmaschinen (MGT und Turbolader):

Hier sind aufbauend auf den Vorstudien sowie realen Versuchen weitere thermodynamische Untersuchungen zur Analyse der Komponentenwechselwirkungen (mögliche Verschiebung und Begrenzungen der Komponentencharakteristiken bei Teillast, Verlustverhalten sowie mechanische Systemantworten wie Schwingverhalten, Bauteilbeanspruchung usw.) erforderlich.

Darüber hinaus bedarf es einer Untersuchung der Komponenten Generator, Rotor und Leistungselektronik, die in die bisherigen Arbeiten nicht einbezogen wurden.

- **Optimierung** der Prozessvarianten und deren Betriebsweise:

Die Erstellung und Modellierung weiterer Prozessvarianten (z.B. die Integrationen eines zweiten Generators am ATL) basierend auf den bestehenden Vorstudien könnte zur einer thermodynamischen Prozessverbesserung führen. Zudem sollte die Systemregelung (Zu- und Abschalten des Turboladers, Regelung des Turbolader-Bypasses usw.) durch simulative und experimentelle Untersuchung ausgeweitet werden.

- **Verbrennungsuntersuchung** der MGT

Die Untersuchung der Klärgasverbrennung in Abhängigkeit von dessen Zusammensetzung und Verfügbarkeit sollte im Hinblick auf wichtige Parameter wie Emissionen, Stabilität des Verbrennungsvorgangs, Temperaturfelder in der Brennkammer usw. simulativ und experimentell zunächst in einer Standardmaschine vorgenommen werden.



---

— **Prozessbewertung** der aufgeladenen MGT

Die gestartete Prozessbewertung sollte um aktuelle Entwicklungen im Gasturbinensegment erweitert werden. Ggf. könnten Gasturbinen mit externer Verbrennung für KWK-Anlagen eine interessante Alternative sein.

Nachstehend ein Dokumentationsverzeichnis auf der Projektcloud mit den wichtigsten Daten für einen späteren Zugriff:

0\_Organisatorisches: Abschlussbericht, Zwischenberichte, Budgetierung

1\_Präsentationen: Projektpräsentation, Austausch DLR, studentische Arbeiten

2\_Masterarbeit\_Vogt: Literatur, Simulationen (zusätzlich im Simulationsordner), Masterarbeit

3\_Masterprojekt CFD-FEM Laufrad: Projektbericht und Dokumentation, CAD, Ansys-Modelle, CADFEM Tutorials

4\_MGT-Pruefstand: Dokumentation Umrüstung, Angebote zur Umrüstung, Sicherheitskonzepte

5\_Simulationen Ausarbeitung: Simulationen, Auswertungen, extra Beschreibung zu den Simulationen

6\_Literatur: gesammelte Literatur zu Mikrogasturbinen, Turbolader und Gesamtprozess



A Anhang Teilprojekt C

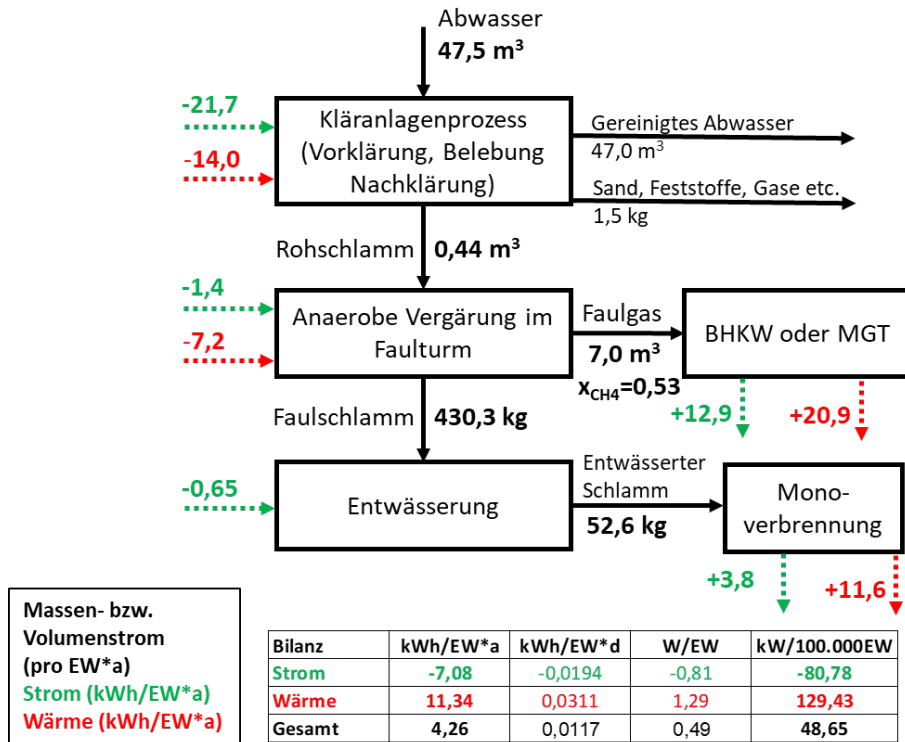


Abbildung 18: Energie- und Massenströme (Variante 1 Standard Kläranlagenprozess)

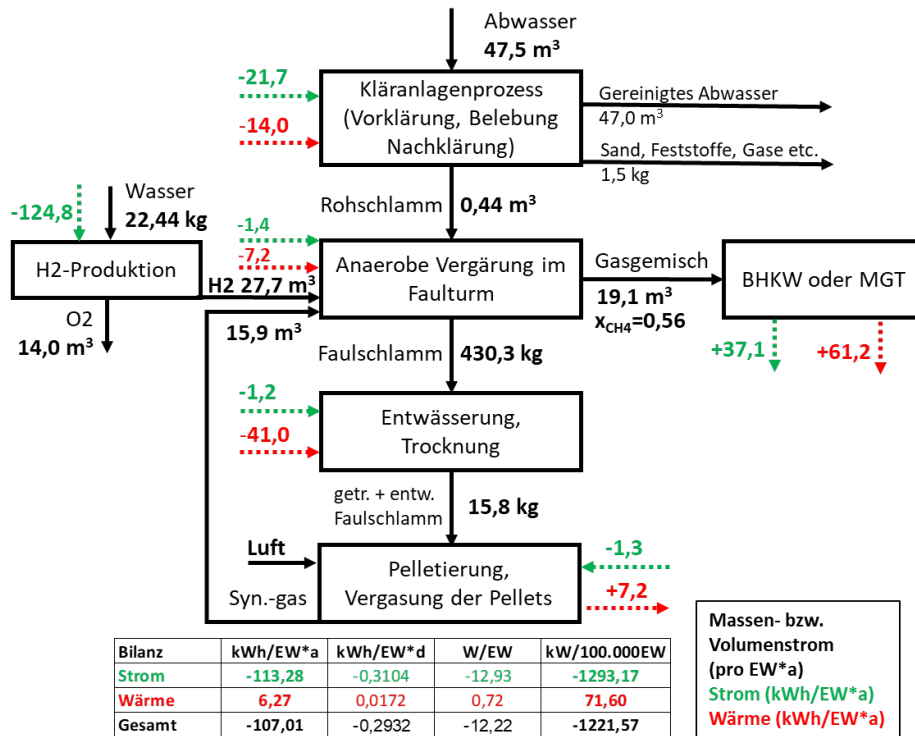


Abbildung 19: Energie- und Massenströme (Variante2 Vergasung, Methanisierung mit Luft, Verstromung)

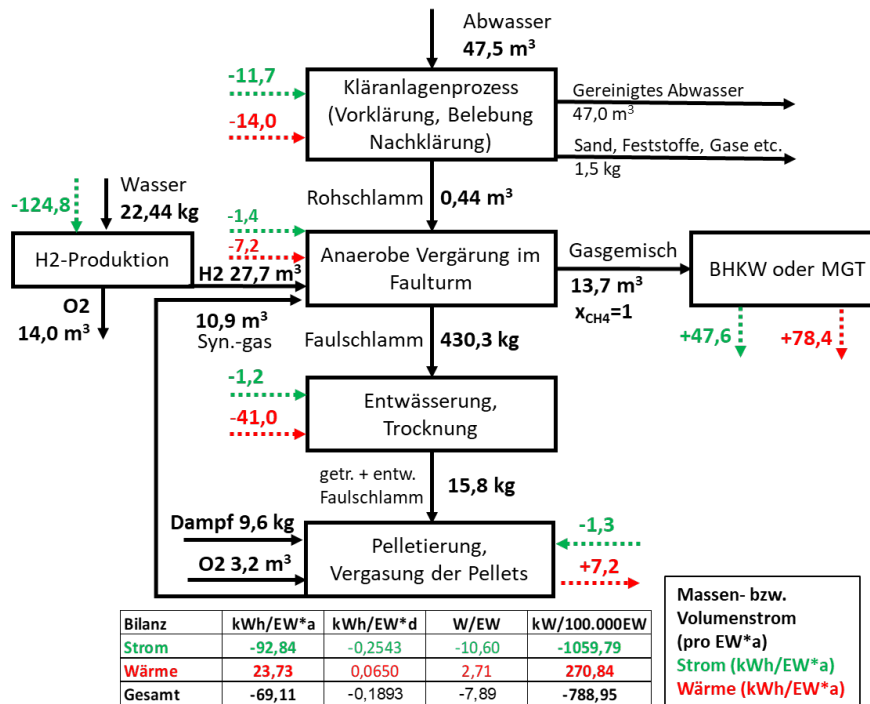


Abbildung 20: Energie- und Massenströme (Variante 3 Vergasung, Methanisierung mit Dampf+O<sub>2</sub>, Verstromung)

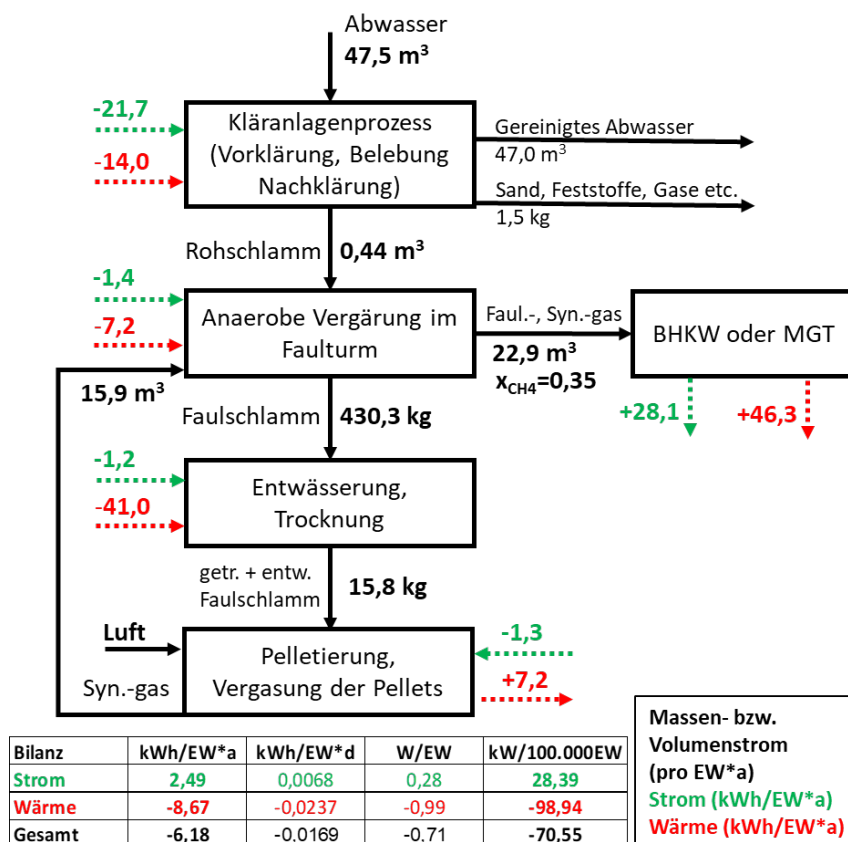


Abbildung 21: Energie- und Massenströme (Variante 4 Vergasung ohne Methanisierung und Verstromung)