



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie**

# Energiepotentiale einer Kopplung KVA - GuD

Darstellung der Wirkungsgradsteigerung verschiedener Konzepte von Kopplungen einer Kehrichtverbrennungsanlage mit einem Gaskombikraftwerk



**Abfallverwertung NÖ**



**Abfalltechnologie + Energiekonzepte**

Beratungen • Expertisen • Projektmanagement • Engineering



**HUTTER FREI POWER GMBH**

**Auftraggeber****Bundesamt für Energie**

Mühlestrasse 4

CH – 3063 Ittigen

**Vertreten durch Daniel Binggeli**

Tel 031 – 322 68 23

Fax 031 – 322 25 00

**Auftragnehmer****Rytec AG**

Alte Bahnhofstrasse 5

Postfach 1139

3110 Münsingen

Tel. 031 724 33 33

Fax. 031 724 33 35

**Hutter Frei Power GmbH**

Sonnhaldenweg 11

5610 Wohlen

Tel. 056 470 90 50

Fax. 056 470 90 51

**Vertreten durch Urban Frei****Vertreten durch Patrick Frei**

| Version | Datum      | Kontrolle (☑☐)   | Freigabe |
|---------|------------|------------------|----------|
| v02     | 11.07.2013 | ☑ UF, 10.07.2013 | ☑ UF     |
|         |            | ☑ PF, 11.07.2013 | ☑ PF     |

## Zusammenfassung

### Ausgangslage

Aufgrund technischer Einschränkungen erreichen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) in der Schweiz einen maximalen elektrischen Wirkungsgrad von netto gut 20%.

Da moderne Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) bzw. Heizkraftwerke einen deutlich höheren Wirkungsgrad erreichen, stellt sich die Frage, ob durch die Kopplung mit einem GuD der Brennstoffnutzen des Kehrichts gesteigert und die gesamte Elektrizitätserzeugung erhöht werden kann.

Nachfolgend eine kurze Zusammenstellung der Vorteile, welche eine Kopplung bringen würde sowie auch deren Risiken.

| Vorteile   | Risiken   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimierung der Stromproduktion</li> <li>- Steigerung des Brennstoffnutzungsgrades</li> <li>- Senkung der spezifischen CO<sub>2</sub>- Emissionen</li> <li>- „Nutzung gemeinsamer Infrastruktur“</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Teillastverhalten der Turbine bei Ausfall / Revision einer Anlage</li> <li>- Kommunikation zwischen mehreren Betriebsgesellschaften</li> </ul> |

### Vorgehen

Drei ausgewählte Konzepte einer Kopplung von KVA und GuD wurden im Kraftwerks-Simulationsprogramm Epsilon Professional abgebildet und der energetische Effekt berechnet. Dabei wurden die Resultate mit einer Referenz-KVA und einem jeweils ungekoppelten GuD mit Schaltungen gemäss den Varianten A, B und C verglichen. Folgende Varianten für die Kopplung hat man berücksichtigt:

- Variante A „Tandem“: Die KVA steht neben einem mittelgrossen GuD-Kraftwerk mit 160 MW thermischer Leistung. Der KVA-Dampf wird mit 95 bar / 320°C als HD-Sattdampf an das GuD geliefert. Ungekoppelt hat die KVA 11 MW<sub>el</sub> und das GuD 79 MW<sub>el</sub>. Durch die Kopplung ergeben sich 94 MW<sub>el</sub> und damit eine um 4 MW<sub>el</sub> höhere Stromproduktion.
- Variante B „Zustupf“: Neben einem durchoptimierten Gross-GuD mit über 440 MW<sub>el</sub> liefert die KVA ihren Dampf (42 bar / 420°C) als kalte Zwischenüberhitzung an das GuD. Die Leistungssteigerung im gekoppelten Zustand beträgt ca. 1 MW<sub>el</sub>.
- Variante C „Heizteam“: Das GuD- Heizkraftwerk (HKW) liefert den gesamten erzeugten Dampf als Prozesswärme an die Industrie. Die KVA liefert den Dampf (110 bar / 420°C) als teilüberhitzter HD-Dampf an das GuD-HKW. Die Kopplung bewirkt eine massive Einsparung an Brennstoff (Gas), verringert jedoch die Stromproduktion bei gleichbleibendem Prozesswärmeabsatz.



## Annahmen

Als Referenz-KVA wurde eine Anlage mit einer Kapazität von 170'000 t/a, einem Heizwert von 12.3 GJ/t, einer Feuerungswärmeleistung von 73 MW, einer Kondensationsturbine und einer Nutzwärmeauskopplung von 30 MW angenommen.

Zur Kopplung wurden für die jeweiligen Varianten die folgenden GuD-Schaltungen ausgewählt:

- LM6000, 42 MW Gasturbine, 1-Druck ZUE Abhitzeessel, 100 bar / 538°C – 41 bar / 535°C
- Alstom GT26, 280 MW Gasturbine, 3-Druck ZUE Abhitzeessel, 141 bar / 565°C – 29 bar / 565°C
- GuD Heizkraftwerk ohne Kondensation, 8 MW Gasturbine, 1-Druck Strahlungskessel, 88 bar / 502°C

## Resultate

Die Auswertung der Konzepte liefert folgende Resultate:

|                                     |                  | Variante A<br>"Tandem"<br>KVA - LM 6000 | Variante B<br>"Zustupf"<br>KVA - GT26 | Variante C<br>"Heizteam"<br>KVA - HKW |
|-------------------------------------|------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Elektrische<br/>Nettleistung</b> | Ungekoppelt      | 89.3 MW                                 | 443.9 MW                              | 29.2 MW                               |
|                                     | Gekoppelt        | 93.9 MW                                 | 445.1 MW                              | 24.3 MW                               |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>4.6 MW</b>                           | <b>1.2 MW</b>                         | <b>-4.9 MW</b>                        |
| <b>Feuerungs-<br/>wärmeleistung</b> | Ungekoppelt      | 233.2 MW                                | 816.9 MW                              | 144.8 MW                              |
|                                     | Gekoppelt        | 233.2 MW                                | 816.9 MW                              | 121.6 MW                              |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>0.0 MW</b>                           | <b>0.0 MW</b>                         | <b>-23.2 MW</b>                       |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>    | Ungekoppelt      | 54.8 t/h                                | 177.6 t/h                             | 36.9 t/h                              |
|                                     | Gekoppelt        | 54.8 t/h                                | 177.6 t/h                             | 32.1 t/h                              |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>0.0 t/h</b>                          | <b>0.0 t/h</b>                        | <b>-4.7 t/h</b>                       |

|  |                  | Variante A<br>"Tandem" | Variante B<br>"Trittbrettfahrer" | Variante C<br>"Heizteam" |
|--|------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Brennstoff-<br/>nutzungsgrad netto</b>                                    | Ungekoppelt      | 51.1%                  | 58.0%                            | 73.8%                    |
|  | Gekoppelt        | 53.1%                  | 58.2%                            | 83.9%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>2.0%</b>            | <b>0.2%</b>                      | <b>10.1%</b>             |
| <b>Elektrischer<br/>Wirkungsgrad</b>   | Ungekoppelt      | 38.3%                  | 54.3%                            | 20.2%                    |
|  | Gekoppelt        | 40.3%                  | 54.5%                            | 20.0%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>2.0%</b>            | <b>0.2%</b>                      | <b>-0.2%</b>             |
| <b>Wärmewirkungsgrad</b>   | Ungekoppelt      | 12.9%                  | 3.7%                             | 73.8%                    |
|  | Gekoppelt        | 12.9%                  | 3.7%                             | 83.9%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>0.0%</b>            | <b>0.0%</b>                      | <b>10.1%</b>             |
| <b>Spezifische CO<sub>2</sub>-<br/>Emissionen pro Netto-<br/>Nutzenergie</b> | Ungekoppelt      | 459 kg/MWh             | 375 kg/MWh                       | 345 kg/MWh               |
|  | Gekoppelt        | 442 kg/MWh             | 374 kg/MWh                       | 315 kg/MWh               |
|  | <b>Differenz</b> | <b>-17.2 kg/MWh</b>    | <b>-0.9 kg/MWh</b>               | <b>-29.8 kg/MWh</b>      |

Tabelle 1: Übersicht absolute und spezifische Kenndaten aller Varianten

## Fazit

**Variante A:** Sinnvoll um Elektrizitätserzeugung der KVA zu steigern. Jedoch geringster Brennstoffnutzungsgrad der beiden gekoppelten Anlagen mit 55%.

**Variante B:** Voraussichtlich empfehlenswert falls GuD-Kraftwerk am gleichen Standort wie KVA gebaut wird und das GuD-Kraftwerk Grundlast fährt.

**Variante C:** Brennstoff wird optimal genutzt. Eingespartes Gas kann anderweitig (z.B. in Gross-GuD mit 60% Wirkungsgrad) verstromt werden.

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                          |    |
| 1.1      | Ausgangslage .....                         | 10 |
| 1.2      | Zielsetzung.....                           | 10 |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b>                          |    |
| 2.1      | Kopplung KVA mit GuD .....                 | 10 |
| <b>3</b> | <b>Vorgehen</b>                            |    |
| 3.1.1    | Auswahl 3 Varianten.....                   | 12 |
| 3.1.2    | Untersuchte Varianten.....                 | 13 |
| 3.1.3    | Systemgrenze.....                          | 14 |
| 3.1.4    | Technische Kenngrößen.....                 | 14 |
| 3.1.5    | Methodik .....                             | 16 |
| <b>4</b> | <b>Die Referenz-KVA</b>                    |    |
| 4.1      | Leistungs- und Kenndaten.....              | 16 |
| <b>5</b> | <b>Kopplung</b>                            |    |
| 5.1      | Variante A „Tandem“ .....                  | 18 |
| 5.1.1    | GuD LM6000 ungekoppelt .....               | 18 |
| 5.1.2    | GuD LM6000 gekoppelt mit KVA.....          | 19 |
| 5.1.3    | Resultate .....                            | 20 |
| 5.2      | Variante B „Zustupf“ .....                 | 22 |
| 5.2.1    | GuD GT26 ungekoppelt.....                  | 22 |
| 5.2.2    | GuD GT26 gekoppelt mit KVA .....           | 23 |
| 5.2.3    | Resultate.....                             | 24 |
| 5.3      | Variante C „Heizteam“ .....                | 26 |
| 5.3.1    | GuD Heizkraftwerk ungekoppelt.....         | 26 |
| 5.3.2    | GuD Heizkraftwerk gekoppelt mit KVA.....   | 27 |
| 5.3.3    | Resultate.....                             | 29 |
| <b>6</b> | <b>Übersicht der Resultate</b>             |    |
| 6.1      | Leistungsdaten aller Varianten .....       | 31 |
| 6.2      | Spezifische Kenndaten aller Varianten..... | 32 |



## **7 Fazit und Empfehlungen**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 7.1 | Effekte durch die Kopplung .....                   | 33 |
| 7.2 | Empfehlung hinsichtlich Kopplung.....              | 33 |
| 7.3 | Realisierbarkeit.....                              | 34 |
| 7.4 | Empfehlungen für die Standortsuche neuer KVA ..... | 35 |

## **8 Weitergehende Fragestellungen**

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 8.1 | Noch nicht beantwortete Fragen in den untersuchten Kopplungsmodellen..... | 36 |
| 8.2 | Variation der Kopplungsmodelle könnte weitere Optimierung bringen.....    | 36 |
| 8.3 | Variation des Standes der Technik in der KVA .....                        | 36 |
| 8.4 | Grundlagen für fundierte Entscheide treffen .....                         | 36 |

## **9 Vorschlag zum weiteren Vorgehen**

**Anhang 1: Epsilon-Simulation Referenz- KVA**

**Anhang 2: Epsilon-Simulation Referenz GuD-Kraftwerk mit LM6000**

**Anhang 3: Epsilon-Simulation Referenz-GuD-Heizkraftwerk**

**Anhang 4: Sankey Diagramme**

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Prinzipschema Kopplung KVA mit GuD.....                   | 11 |
| Abbildung 2: Systemgrenzen KVA und GuD gekoppelt und ungekoppelt.....  | 14 |
| Abbildung 3: Schema Kopplung GuD LM6000 und KVA.....                   | 20 |
| Abbildung 4: Schema Kopplung GuD GT26 und KVA.....                     | 24 |
| Abbildung 5: Schema gekoppelt GuD HKW und KVA.....                     | 29 |
| Abbildung 6: Sankey Referenz-KVA.....                                  | 44 |
| Abbildung 7: Sankey GuD LM6000.....                                    | 45 |
| Abbildung 8: Sankey GuD LM6000 gekoppelt mit KVA.....                  | 46 |
| Abbildung 9: Sankey GuD GT26.....                                      | 47 |
| Abbildung 10: Sankey Diagramm GT26 gekoppelt mit KVA.....              | 48 |
| Abbildung 11: Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk.....                   | 49 |
| Abbildung 12: Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk gekoppelt mit KVA..... | 50 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht absolute und spezifische Kenndaten aller Varianten..... | 4  |
| Tabelle 2: Leistungsdaten der Referenz-KVA ungekoppelt.....                  | 17 |
| Tabelle 3: Kenndaten Referenz-KVA ungekoppelt.....                           | 17 |
| Tabelle 4: Leistungsdaten GuD LM6000.....                                    | 19 |
| Tabelle 5: Leistungsdaten GuD LM6000 mit KVA gekoppelt.....                  | 21 |
| Tabelle 6: Resultate Variante A "Tandem" gekoppelt und ungekoppelt.....      | 21 |
| Tabelle 7: Leistungsdaten GuD GT26.....                                      | 23 |
| Tabelle 8: Leistungsdaten GuD GT26 mit KVA gekoppelt.....                    | 25 |
| Tabelle 9: Resultate Variante B "Zustupf" gekoppelt und ungekoppelt.....     | 25 |
| Tabelle 10: Leistungsdaten GuD HKW.....                                      | 27 |
| Tabelle 11: Leistungsdaten GuD Heizkraftwerk mit KVA gekoppelt.....          | 30 |
| Tabelle 12: Resultate Variante C "Tandem" gekoppelt und ungekoppelt.....     | 30 |
| Tabelle 13: Übersicht Leistungsdaten aller Varianten.....                    | 31 |
| Tabelle 14: Übersicht spezifische Kenndaten aller Varianten.....             | 32 |



## Glossar

**AHK** Abhitzekessel oder Abhitzedampferzeuger. Bedeutung in dieser Studie: Eine Gasturbine nachgeschalteter, ungefeuerter oder wenig zusatzgefeuerter Kessel zur Produktion von Dampf mittels den heissen Abgasen der Gasturbine.

Allgemeine Definition: Ein Abhitzekessel ist ein Kessel, der das heisse Abgas aus einem vorgeschalteten Prozess zur Dampferzeugung oder zur Warmwassergewinnung nutzt. Auf diese Weise wird die Abwärme des Prozesses, die sonst ungenutzt in die Atmosphäre verloren ginge, zurückgewonnen und es verbessert sich der energetische Wirkungsgrad der Anlage.

**DT** Dampfturbine

**GT** Gasturbine

**GuD** Kurzform für Gas- und Dampf-Kombikraftwerk oder Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk mit der Kurzform GuD-Kraftwerk oder Kraftwerk mit kombiniertem Gas- und Dampfprozess oder Kraftwerk mit kombiniertem Gas- und Dampfkreislauf. Für diese Kraftwerks-Technologie werden weitere Bezeichnungen ohne GuD geführt, wie z.B. Gaskombikraftwerke oder Kombikraftwerke oder kombinierte Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke.

GuD wird nicht nur für Kraftwerke sondern auch für Heizkraftwerke verwendet.

**HD** Hochdruck

**HKW** Heizkraftwerk. Anlage, in der gleichzeitig und im gleichen Prozess sowohl Elektrizität als auch Nutzwärme erzeugt wird wobei der hauptsächliche Anteil der Dampferzeugung zur Nutzwärmelieferung an Dritte erfolgt.

Definition gemäss AGFW-FW308: Ein Heizkraftwerk ist ein KW, dessen wesentlicher Bestandteil eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage ist. Das Heizkraftwerk kann auch Anlagenteile umfassen, in denen nur elektrische Energie (z.B. aus einer Kondensationsturbine) oder nur Wärme (z..B. aus einem Heizkessel) ungekoppelt bereitgestellt werden.

**KVA** Kehrichtverbrennungsanlage

**KW** Kraftwerk. Ein Kraftwerk ist eine Anlage, die dazu bestimmt ist, durch Energieumwandlung elektrische Energie zu erzeugen.

Nach Art der Antriebsmaschine werden insbesondere Dampfturbinen-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoren-Kraftwerke unterschieden. Eine aktuell gebräuchliche Kombination ist die einer Gasturbine mit nachgeschalteter Dampfturbine (GuD-Kraftwerk bzw. GuD-Heizkraftwerk).

**MD** Mitteldruck

**ND** Niederdruck

**R1** Verwertungsverfahren, Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung.

**Strahlungskessel** Ein Kessel, dessen Brennkammer bzw. Feuerraum aus auskleidenden Kühlrohren (meistens in Funktion eines Verdampfers) besteht, an die die Wärme der Kesselfeuerung überwiegend durch Strahlung übertragen wird.

**WKK** Definition gemäss AGFW-FW308: Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in mechanische oder elektrische Energie und nutzbare Wärme innerhalb eines thermodynamischen Prozesses. Unter Gleichzeitigkeit ist zu verstehen, dass der Energieinhalt eines Prozessmediums (Gas oder Dampf) innerhalb eines thermodynamischen Prozesses sowohl zur Strom- als auch zur Wärmeerzeugung genutzt wird (KWK-Prozess).

**(in Deutschland KWK)**

Nutzbare Wärmeerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung liegt nur dann vor, wenn die Wärme außerhalb der KWK-Anlage für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Kälteerzeugung oder als Prozesswärme verwendet wird.

**ZUE** Zwischenüberhitzung



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) in der Schweiz erreichen heute einen maximalen elektrischen Wirkungsgrad von etwa netto 20%. Obwohl es technisch möglich ist, stromoptimierte KVA mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 30% zu betreiben (HR AVI Amsterdam), ist dies noch immer eine Ausnahme, da die resultierenden betrieblichen Nachteile die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.

Im Vergleich zu KVA liegt der elektrische Wirkungsgrad von modernen Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) bei rund 59%. Da die aktuell diskutierte Energiestrategie auch den Bau von GuD vorsieht, stellt sich die Frage, ob die Stromausbeute der KVA und GuD durch die Kopplung erhöht werden kann, um auch einen Beitrag zur Steigerung der Elektrizitätserzeugung im Zusammenhang mit dem Abschalten der Kernkraftwerke leisten zu können, ohne die oben erwähnten betrieblichen Probleme in Kauf nehmen zu müssen oder ob der Brennstoffnutzen des Kehrichts durch die Kopplung mit einem GuD nicht gesteigert werden kann.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es zu klären, wie und ob eine KVA mit einem GuD gekoppelt werden kann und welchen Effekt dies auf den Nutzungsgrad der KVA, der gekoppelten Gesamtanlage und auf die Elektrizitätserzeugung der gekoppelten Gesamtanlage hat.

# 2 Grundlagen

## 2.1 Kopplung KVA mit GuD

Die Abkürzung GuD wurde von der Firma Siemens als geschützte Markenbezeichnung eingeführt, wobei der Schutz unterdessen abgelaufen ist. GuD steht für Kombination eines Gas- und Dampfkreislaufes. In Abhängigkeit dessen, ob gleichzeitig und in einem Prozess Elektrizität und Nutzwärme erzeugt werden, spricht man von einem GuD-Heizkraftwerk, bei einer reinen oder hauptsächlichen Elektrizitätserzeugung spricht man von einem GuD-Kraftwerk. Andere Bezeichnungen sind Kombi-(Heiz)kraftwerk, Kombiniertes Gas- und Dampf-(Heiz)kraftwerk oder kombiniertes Gasturbinen- und Dampfturbinen-(Heiz)kraftwerk.

Bei den untersuchten Kopplungsvarianten kommt sowohl die GuD-Kraftwerkstechnologie als auch die GuD-Heizkraftwerkstechnologie zur Anwendung.

Die Gasturbine saugt Umgebungsluft an, verdichtet sie und nach der Verbrennung wird das heisse Abgas in der Turbine entspannt. Die Gasturbine liefert als Nutzen Elektrizität, Wärmeenergie im heissen Abgas und Sauerstoff im Abgas für eine mögliche nachfolgende Verbrennung in einer Kesselfeuerung.

Das heisse Gasturbinen-Abgas wird in einen Dampferzeuger geführt. Im Dampferzeuger werden die Abgase abgekühlt und über einen Schornstein in die Umgebung abgeführt. Im Dampferzeuger wird aus Speisewasser Frischdampf erzeugt. Der Frischdampf wird in eine Dampfturbine geführt, dort entspannt und als Folge daraus wird im Dampfturbinen-Generator Elektrizität erzeugt.

In GuD-(Heiz)Kraftwerken gibt es dabei zwei verschiedene Dampferzeuger-Technologien. Der Abhitzeessel (AHK) besteht aus lauter Konvektions-Heizflächen, der Strahlungskessel besteht aufgrund seiner Leistungsfeuerung aus einem Feuerraum, in dem ein Strahlungswärmeübergang auf die Feuerraumwände, die als Verdampfer agieren, stattfindet. Strahlungskessel werden in reinen Dampfturbinen-(Heiz)Kraftwerken eingesetzt und stellen somit den ursprünglichen Stand der Technik dar.

In diesen Prozess wird nun der Dampf aus der KVA in den Kessel des GuD zugeführt. Somit kann dieser Dampf gegenüber herkömmlichen KVA auf ein höheres Enthalpieniveau gebracht werden, wodurch sich die spezifische Elektrizitätserzeugung erhöhen lässt.

Die nachfolgende Grafik zeigt, wie eine KVA mit einem GuD gekoppelt werden könnte.

Zuerst wird das Speisewasser am Ende des GuD-Dampferzeugers vorgewärmt bevor es zur KVA geleitet wird. Der in der KVA erzeugte Dampf wird anschliessend in Form von Satttdampf oder überhitztem Dampf wieder zurück zum GuD-Dampferzeuger geführt.

Dort kann es entweder dem Satttdampf des GuD-Dampfessels (A), in den Kreislauf der kalten Zwischenüberhitzung (B) oder vor dem Endüberhitzer (C) zugeführt werden.

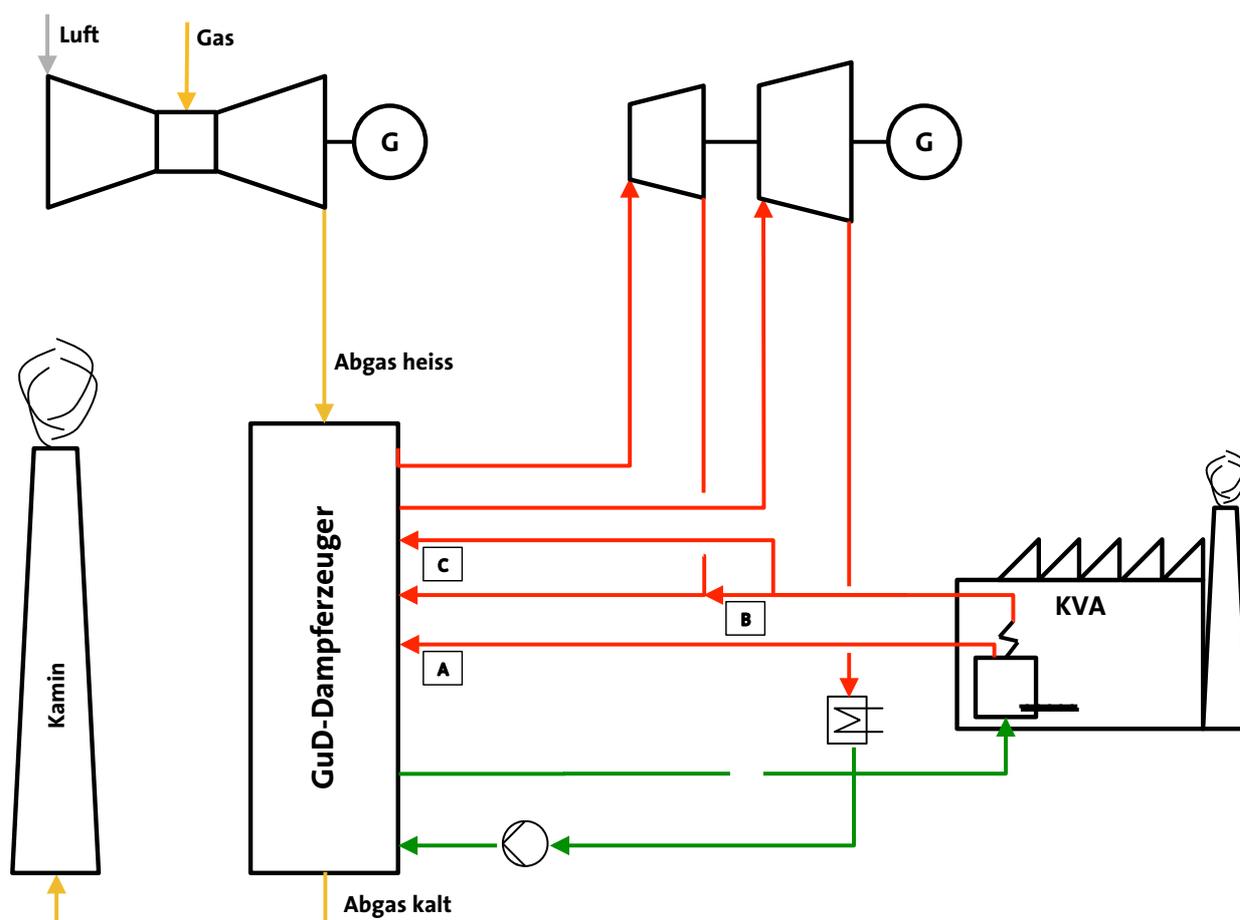


Abbildung 1: Prinzipschema Kopplung KVA mit GuD

## 3 Vorgehen

### 3.1.1 Auswahl 3 Varianten

In einem ersten Schritt wurden alle möglichen Kopplungsvarianten zwischen KVA und GuD dem Auftraggeber präsentiert. Daraus hat der Auftraggeber drei Varianten ausgewählt, welche eine Optimierung durch die Kopplung erwarten lassen. Die drei Varianten sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Höhe an erzeugter Nutzenergie zwar nicht direkt vergleichbar, aber es wurde mehr Wert auf Realisierbarkeit und Anwendbarkeit in der Schweiz gelegt.

Gemäss Vereinbarung mit dem Auftraggeber soll jede Kopplungsvariante mit einem definierten und unterschiedlichen GuD-Kraftwerk untersucht werden.

Durch die Wahl der drei GuD-Kraftwerks-Typen und deren Randbedingungen ist die Vergleichbarkeit zwischen den drei Kopplungsvarianten aufgrund der unterschiedlichen Höhe der erzeugten Nutzenergie nicht wirklich gegeben. Man müsste aus übergeordneter Betrachtung (bzw. Landesbetrachtung) dann noch zusätzliche Kraftwerke nach Wahl hinzumodellieren, um den gleichen Nutzen für alle Kopplungsvarianten zu erhalten, was aber nicht Bestandteil dieser Studie war.

Demzufolge gibt es gemäss Aufgabenstellung die folgenden Schaltungsvarianten:

- Gesamtanlage bestehend aus ungekoppelter KVA-Anlage 42bar / 420°C und GuD-Kraftwerk mit Gasturbine GE LM6000PD
- Gesamtanlage bestehend aus KVA-Anlage 110bar / 320°C gekoppelt mit GuD-Kraftwerk mit Gasturbine GE LM6000PD
- Gesamtanlage bestehend aus ungekoppelter KVA-Anlage 42bar / 420°C und GuD Kraftwerk mit Gasturbine ALSTOM GT26
- Gesamtanlage bestehend aus KVA-Anlage 42bar / 420°C gekoppelt mit GuD-Kraftwerk mit Gasturbine ALSTOM GT26
- Gesamtanlage bestehend aus ungekoppelter KVA-Anlage 42bar / 420°C mit GuD-Heizkraftwerk ohne Kondensationsprozess
- Gesamtanlage bestehend aus KVA-Anlage 95bar / 420°C gekoppelt mit GuD-Heizkraftwerk ohne Kondensationsprozess

Die ungekoppelte KVA-Anlage 42bar / 420°C ist dabei immer die gleiche Schaltung und repräsentiert das vereinbarte Referenz-KVA ohne Kopplung mit einem GuD.

Aus obigem Sachverhalt konzentriert sich die Studie auf den Vergleich zwischen ungekoppelter und gekoppelter Schaltungsvariante mit einem bestimmten GuD-Kraftwerks-Typ.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die drei GuD-Kraftwerke sowohl in ungekoppelter Variante als auch in gekoppelter Variante eine unterschiedliche Auslegung (Design) haben. Damit können immer beste verfügbare Technik für den Bau von ungekoppelter KVA und GuD verglichen werden mit der besten verfügbaren Technik für den Bau von gekoppelter KVA und GuD.

Gemäss Aufgabenstellung liefert die ungekoppelte KVA-Anlage 30 MW Prozessdampf-Nutzwärme.

Das GuD-Kraftwerk mit GT26 und dasjenige mit LM6000PD liefern gemäss Aufgabenstellung in ungekoppelter Variante keinen Prozessdampf.

Das GuD-Heizkraftwerk ohne Kondensationsprozess liefert gemäss Aufgabenstellung in ungekoppelter Variante eine solche Prozessdampf-Nutzwärmeleistung, dass das O<sub>2</sub> im Abgas einer 8 MW Gasturbine durch die Kesselfeuerung so weit ausgebrannt wird wie technisch realisierbar.

Die KVA-Anlage im gekoppelten Zustand wurde so modelliert, dass die KVA-Dampfturbinenanlage mit Kondensationsprozess ausgeschaltet ist.

Der erzeugte Frischdampf in der KVA-Anlage wird in der KVA-Anlage nur für Russbläserdampf verwendet. Der gesamte weitere Frischdampf wird ins GuD-Kraftwerk geführt.

Der KVA-Eigenbedarfsdampf wird mit Ausnahme des Russbläserdampfes dann wieder durch das GuD-Kraftwerk geliefert.

Das Speisewasser der KVA-Anlage wird durch das GuD-Kraftwerk in der geforderten Temperatur geliefert, so dass die Entgaseranlage in der KVA ebenfalls ausgeschaltet ist.

Das heisse Kondensat vom dampfbeheizten LUVO wird zum GuD zurückgeführt.

Die Unterschiede im Design zwischen gekoppeltem GuD und ungekoppeltem GuD liegen im Wesentlichen

- zum Ersten in der Grösse der Heizflächen des Dampferzeugers, wobei jedoch die Schaltung mit der Reihenfolge der Heizflächen für einen bestimmten GuD-Kraftwerks-Typ gleich belassen wurde. Damit kann auch geprüft werden, ob das GuD-Kraftwerk sowohl im gekoppelten Betriebsfall als auch im ungekoppelten Betriebsfall technisch optimiert betrieben werden kann, da dies eine Randbedingung bei der Kopplung einer KVA und eines GuD ist.
- zum Zweiten im Wirkungsgrad des Dampfturbosatzes durch die unterschiedlichen Dampfvolumentröme und die unterschiedliche Dampfturbinen-Grösse.

Für einen bestimmten GuD-Kraftwerks-Typ wurde der Gasturbinen-Typ, dessen Lastpunkt und die Höhe der totalen Feuerungswärmeleistung des GuD zwischen gekoppelter und ungekoppelter Variante gleich belassen.

Ebenfalls wurde die Rauchgastemperatur vor Kamin und das Vakuum des Kondensationsprozesses, soweit vorhanden, gleich belassen.

Desweiteren wurden ebenfalls das Design der Prozessdampf-Nutzwärmeauskopplung und der Druck des KVA-Eigenbedarfsdampfes für sämtliche Schaltungsvarianten gleich belassen.

Schlussendlich wurden der Druck und die Temperatur des Speisewassers im Entgaser für einen bestimmten GuD-Kraftwerks-Typ ebenfalls gleich belassen.

### 3.1.2 Untersuchte Varianten

Die drei Varianten, welche genauer untersucht wurden waren:

|                        |   |
|------------------------|---|
| Variante A „Tandem“:   | KVA Dampf 95 bar 320°C wird ans GuD-Kraftwerk als HD-Sattdampf geliefert                        |
| Variante B „Zustupf“:  | KVA-Dampf 42 bar 420°C wird ans GuD-Kraftwerk als kalte Zwischenüberhitzung geliefert           |
| Variante C „Heizteam“: | KVA-Dampf Dampf 110 bar 420°C wird ans GuD-Heizkraftwerk als teilüberhitzter HD-Dampf geliefert |



### 3.1.3 Systemgrenze

Die nachfolgende Grafik zeigt die Systemgrenzen mit den Energieströmen der ungekoppelten und gekoppelten Anlagen:

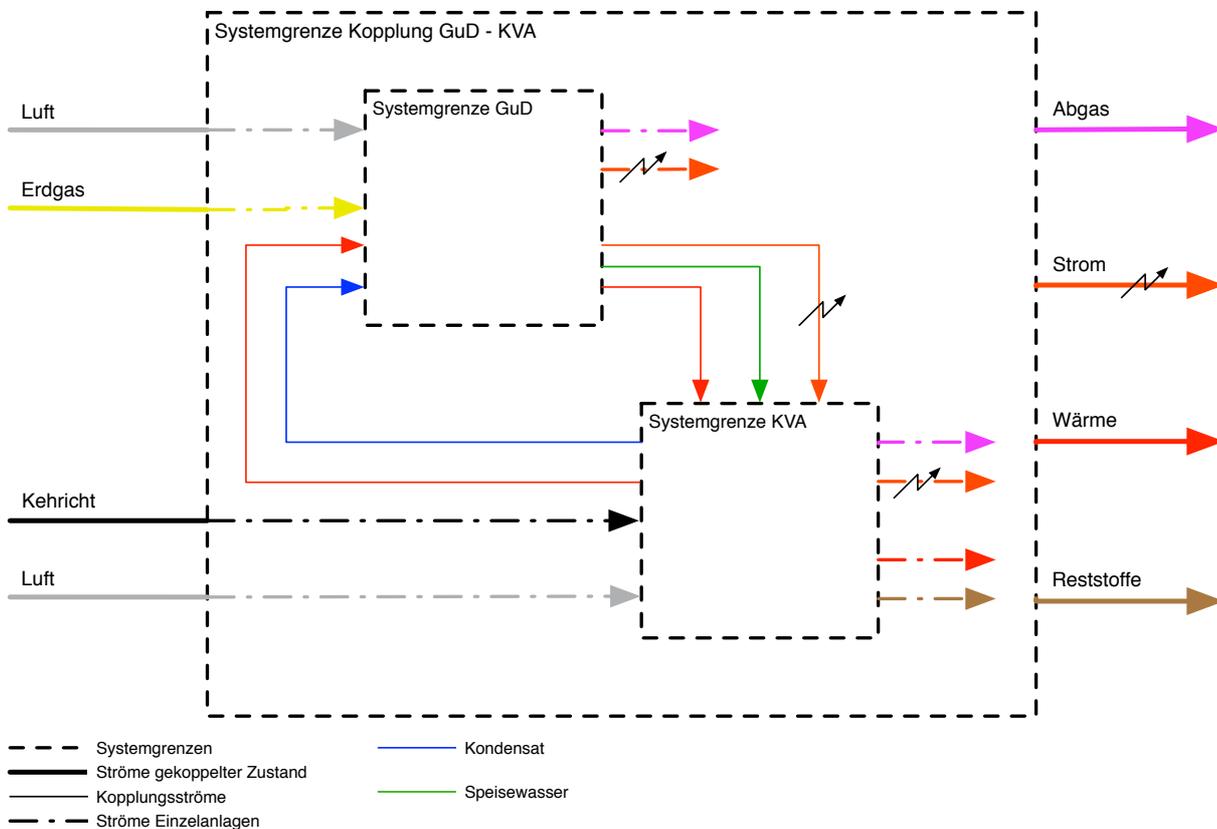


Abbildung 2: Systemgrenzen KVA und GuD gekoppelt und ungekoppelt

### 3.1.4 Technische Kenngrößen

Für den Vergleich werden folgende absoluten **Leistungsdaten** herangezogen:

- Elektrische Brutto- und Nettoleistung  $P_{el}$
- Nutzwärmeleistung  $\dot{Q}_H$
- CO<sub>2</sub>- Emissionen (ohne Berücksichtigung erneuerbar nicht erneuerbar)
- Brennstoffeinsatz (Feuerungswärmeleistung), welcher sich aus dem Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_b$  und dem Heizwert  $H_u$  des Brennstoffes errechnet.

$$\text{Feuerungswärmeleistung} = \dot{m}_b \cdot H_u$$

Daraus errechnen sich die folgenden **spezifischen Kenndaten**, die ebenfalls zur Beurteilung herangezogen werden:

Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffnutzungsgrad)  $\eta_{gesamt}$  :

$$\eta_{gesamt} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_H}{\dot{m}_b \cdot H_u}$$

Gilt nur für ungekoppelte Anlagen und für die gekoppelte Gesamtanlage. Bei den gekoppelten Einzelanlagen kommen noch die ausgetauschten Wärmeenergieströme im Zähler und/oder im Nenner hinzu.

Kesselwirkungsgrad  $\eta_k$  :

$$\eta_k = \frac{\text{Produzierte Dampfeenergie}}{\dot{m}_b \cdot H_u}$$

Der Zähler heisst vereinfacht: An den Wasser-Dampf-Kreislauf übertragene Wärmeleistung, der Nenner heisst die Summe von in den Kessel eingetragene Wärmeenergieströme, d.h. im Gasturbinen-Abgas und durch den Brennstoffeinsatz.

Elektrischer Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  :

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_b \cdot H_u}$$

Zum Nenner gleiche Bemerkung wie beim Gesamtwirkungsgrad.

Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)  $\eta_{th}$  :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_b \cdot H_u}$$

Zum Nenner gleiche Bemerkung wie beim Gesamtwirkungsgrad.

Anlagenstromkennzahl  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_H}$$

Zum Nenner gleiche Bemerkung wie beim Gesamtwirkungsgrad.



Nur für die thermische Verwertung von Abfall relevante Grösse ist der R1- Faktor<sup>1</sup>:

$$R1 = \frac{(2.6 \times P_{el} + 1.1 \times \dot{Q}_H) - (E_f + E_i)}{0.97 \times (\dot{m}_b \cdot H_u + E_f)}$$

Dabei ist  $E_f$  fossile Energie zur Dampferzeugung und  $E_i$  zusätzlich importierte Energie.

Spezifische CO<sub>2</sub>- Emissionen

$$\text{spez. CO}_2 \text{ - Emissionen} = \frac{\text{CO}_2}{P_{el} + \dot{Q}_H}$$

Zum Nenner gleiche Bemerkung wie beim Gesamtwirkungsgrad.

### 3.1.5 Methodik

Die drei ausgewählten Varianten wurden mit Hilfe des Kraftwerks-Simulationsprogrammes namens Ebsilon Professional, entwickelt und vertrieben von STEAG Energy Services GmbH, abgebildet. Dabei stellte man die KVA sowie das GuD zuerst ungekoppelt dar und in einem zweiten Schritt gekoppelt. Dadurch konnten bei allen Varianten die Kenndaten gekoppelt wie auch ungekoppelt für die einzelne Anlage sowie für das Gesamtsystem ermittelt werden.

## 4 Die Referenz-KVA

### 4.1 Leistungs- und Kenndaten

Um eine für die Schweiz realistische Anlagengrösse zu erhalten, nahm man die Mittelwerte der Leistungsdaten der KVA Basel, Bern, Buchs SG, Hagenholz, Hinwil, Lausanne, Monthey, Tessin, Thun und Thurgau.

Die KVA besteht aus 1 Verbrennungsofenlinie mit einem üblichen 1-Druck-Kessel ohne Zwischenüberhitzung mit Frischdampfzuständen 42 bar / 420°C. Die Luft wird in einem LUVVO mittels Anzapfdampf auf 120°C vorgewärmt. Die Rauchgase verlassen den Kessel mit einer Temperatur von 200°C. Der gesamte Luftüberschuss der Kehrrechtverbrennung beträgt 1.45.

Die Entnahme-Kondensations-Dampfturbine weist die folgenden isentropen Wirkungsgrade auf: MD-DT = 86.0%, ND-DT1 = 83%, ND-DT2 = 82%, Kondensations-DT = 76%.

Der Kondensationsdampf wird in einem luftgekühlten Kondensator (LUKO) kondensiert. Dabei wurde eine jahresdurchschnittliche Umgebungstemperatur von 9°C angenommen. Gemäss LUKO-Hersteller wurde ein für diesen Anwendungsfall realistisches technisch bestmögliches Vakuum von 54 mbar angenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das wirtschaftliche Optimum dieses Vakuums von den Energiepreisen, insbesondere dem Elektrizitätspreis abhängig ist. Je tiefer die Elektrizitätspreise, desto schlechter wird das Optimum des Vakuumwertes (höherer Abdampfdruck).

Die 30 MW Nutzwärme wird der Dampfturbine in Form von 6 bar Dampf entnommen.

<sup>1</sup> [Leitlinien zur Auslegung der R1-Energieeffizienzformel für Verbrennungsanlagen](#), 2011

Als Entgaser wird ein üblicher atmosphärischer Entspanner mit einer Speisewassertemperatur von 105°C vorgesehen.

Das Kaltkondensat (Turbinenkondensat) wird in einem 1-stufigen Kondensatvorwärmer mit Unterkühler erwärmt, der mit Anzapfdampf beheizt wird.

Somit erhält man folgende Werte:

|  |         |      |
|--|---------|------|
| • Max. Kapazität Kehrlichtmenge            | 170'000 | t/a  |
| • Heizwert                                 | 12.30   | GJ/t |
| • Nenn Frischdampfzeugung (42 bar / 420°C) | 87.4    | t/h  |
| • Totale Nutzwärmeleistung                 | 30      | MW   |
| • Elektrische Bruttoleistung               | 13.138  | MW   |

**Tabelle 2: Leistungsdaten der Referenz-KVA ungekoppelt**

Obwohl die Dampfparameter mit 42 bar / 420°C auf den bekannten Anlagen nicht üblich sind, ist man davon ausgegangen, dass dies bei einer energetisch optimierten Anlage realistisch sein wird.

Aufgrund der Abbildung in Epsilon Professional ergeben sich die nachstehenden Kenndaten:

|  |                 |
|--|-----------------|
| • Brennstoffnutzungsgrad brutto / netto    | • 59.1% / 56.2% |
| • Kesselwirkungsgrad                       | • 86%           |
| • Elektrischer Wirkungsgrad brutto / netto | • 18.0% / 15.1% |
| • Wärmewirkungsgrad                        | • 41.1%         |
| • R1-Faktor                                | • 0.98          |

**Tabelle 3: Kenndaten Referenz-KVA ungekoppelt**

Die Werte zeigen, dass die Anlage mit einem Brutto-Brennstoffnutzungsgrad von 59.1% für KVA einen relativen hohen Wert aufweist. Ebenfalls hoch ist der R1-Faktor von 0.98 bei einem CH-Durchschnitt von 0.74.

Im Anhang 1 befindet sich die Epsilon-Darstellung der Referenz-KVA.



## 5 Kopplung

### 5.1 Variante A „Tandem“

#### 5.1.1 GuD LM6000 ungekoppelt

Bei Variante A wird im GuD-Kraftwerk die Gasturbine des Modells GE LM6000 vorgesehen. Die LM6000 wird von General Electric gebaut und geliefert. Die LM6000 ist eine abgewandelte Flugzeug-Turbine, welche mit Erdgas betrieben wird. Der Gasturbosatz hat eine Nennleistung von 42 MW und einen elektrischen Wirkungsgrad von 40.2%. Die Gasturbine des gleichen Modells ist auch in der Anlage Zabalgarbi in Bilbao eingebaut, deren Art und Weise der Kopplung zwischen einer KVA und einem GuD als Vorlage für Variante 1 diente.

Das GuD-Kraftwerk besteht aus 1 Gasturbosatz, dessen Abgase in einen zusatzgefeuerten 1-Druck-Abhitzeessel mit einfacher Zwischenüberhitzung geführt werden. Die Zusatzfeuerung im AHK wird aufgrund der hohen Frischdampf-Zustände und der relativ kalten Gasturbinen-Abgase von ca. 460°C benötigt.

Die Rauchgas-Temperatur vor Kamin beträgt bei Nennleistung 128°C.

Die Frischdampf-Zustände betragen auf der HD-Seite 100 bar / 538°C und die heisse Zwischenüberhitzung hat 41 bar / 535°C.

Die Dampfturbine weist die folgenden isentropen Wirkungsgrade auf: HD-DT = 88.5%, MD-DT = 90%, ND-DT = 87%, Kondensations-DT = 81%.

Der Kondensationsdampf wird in einem luftgekühlten Kondensator (LUKO) kondensiert. Dabei wurde eine jahresdurchschnittliche Umgebungstemperatur von 9°C angenommen. Gemäss LUKO-Hersteller wurde ein für diesen Anwendungsfall realistisches Vakuum von 54 mbar angenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das wirtschaftliche Optimum dieses Vakuums von den Energiepreisen, insbesondere dem Elektrizitätspreis abhängig ist. Je tiefer die Elektrizitätspreise, desto schlechter wird das Optimum des Vakuums (höherer Abdampfdruck).

Die 30 MW Nutzwärmeleistung wird aus der Dampfturbine als Entnahmedampf mit einem Druck von 6 bar entnommen.

Als Entgaser wird ein üblicher atmosphärischer Entspanner mit einer Speisewassertemperatur von 105°C vorgesehen.

| <b>Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt</b>                                       |  |
|--|--|
| GUD-Kraftwerk mit GE LM6000; 1 GT auf 1 Kessel auf 1 DT; nicht gekoppelt mit KVA |  |
| Kraftwerksname   | CCS-K 110  |
| Gasturbinen Konfiguration  | GE LM6000PD DryLowEmission - neu u. sauber         |
| Dampferzeuger Konfig.  | 1-Druck ZUE Abhitzedampferzeuger Erdgas gefeuert   |
| Dampfturbinen Konfig.  | Entnahme-Kondensations-Dampfturbine mit Getriebe   |
| Kaltes Ende  | Luftkondensator                                    |
| Nutzwärmeauskopplung   | Entnahmedampf dient zur Prozessdampfversorgung     |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"  | GT = 100% Last; max. Kesselfeuerung adiabat=800 °C |
| <b>Anlagen-Leistungsdaten</b>  |  |
| Nenn-Frischdampferzeugung  | 109.1 t/h  |
| Nenn-Prozessdampflieferung   | 0.0 t/h  |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto   | 0.0 kW   |
| An KVA-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto                                 | 0.0 kW   |
| Elektrische Bruttoleistung Gasturbosatz  | 42000.0 kW   |
| Elektrische Bruttoleistung Dampfturbosatz  | 37736.2 kW   |
| Totale elektrische Bruttoleistung  | 79736.2 kW   |
| Betriebseigenverbrauch elektrisch  | 1509.4 kW  |
| Totale elektrische Nettoleistung   | 78226.7 kW   |
| Feuerungswärmeleistung Dampferzeuger   | 55627.2 kW   |
| Totale Feuerungswärmeleistung  | 160224.9 kW  |
| Von KVA-Anlage erhaltene Wärmeleistung   | 0.0 kW   |

Tabelle 4: Leistungsdaten GuD LM6000

### 5.1.2 GuD LM6000 gekoppelt mit KVA

Abbildung 4 zeigt das Schema der gekoppelten Schaltung. Zuerst wird das Speisewasser der KVA im AHK auf 180°C vorgewärmt und anschliessend im Kessel der KVA Satttdampf-niveau bei 110 bar erzeugt. Dieser Satttdampf gelangt zurück in den GuD-AHK und zwar zwischen HD-Kesseltrommel und erstem HD-Überhitzer. Dieser Dampf wird zusammen mit dem im GuD erzeugten HD-Satttdampf zuerst auf 538°C überhitzt und nach einer ersten Verstromung nochmals auf 535°C bei 41 bar zwischenüberhitzt.



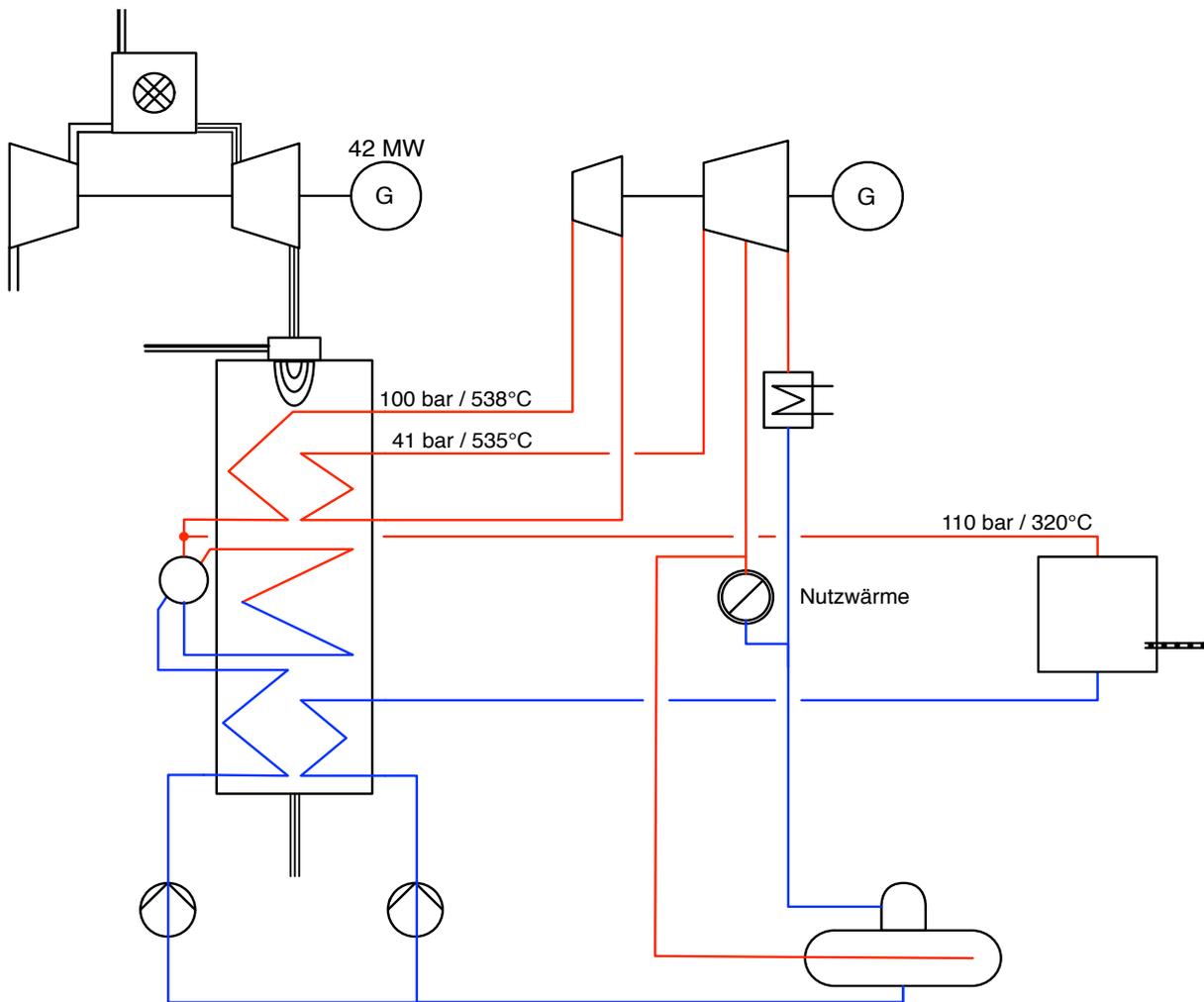


Abbildung 3: Schema Kopplung GuD LM6000 und KVA

### 5.1.3 Resultate

Die nachfolgenden Leistungsdaten zeigen, dass sich bei gleichbleibendem Energieinput die Nettostromproduktion durch die Kopplung um 4'630 kW auf 93'884 kW erhöht.

| Anlagen Leistungsdaten GuD plus KVA gekoppelt              | ungekoppelt | gekoppelt  |
|--|-------------|------------|
| Nenn-Frischdampferzeugung GuD (mit KVA-Frischdampf)        | 109.1 t/h   | 175.4 t/h  |
| Nenn-Prozessdampflieferung                                 | 43.6 t/h    | 44.1 t/h   |
| Totale Prozessdampf-Nutzwärmeleistung (Netto) GuD plus KVA | 30'000 kW   | 30'000 kW  |
| Totale elektrische Bruttoleistung GuD plus KVA             | 92'874 kW   | 97'700 kW  |
| Totaler Betriebseigenverbrauch elektrisch GuD plus KVA     | 3'620 kW    | 3'816 kW   |
| Totale elektrische Nettoleistung GuD plus KVA              | 89'254 kW   | 93'884 kW  |
| Totale Feuerungswärmeleistung GuD plus KVA                 | 233'245 kW  | 233'245 kW |
| CO <sub>2</sub> -Emissionen GuD                            | 32.5 t/h    | 32.5 t/h   |
| CO <sub>2</sub> -Emissionen KVA                            | 22.2 t/h    | 22.2 t/h   |
| Totale CO <sub>2</sub> -Emissionen GuD plus KVA            | 54.8 t/h    | 54.8 t/h   |

Tabelle 5: Leistungsdaten GuD LM6000 mit KVA gekoppelt

Die Kenndaten zeigen, dass durch die Kopplung sich der Brennstoffnutzungsgrad netto des Gesamtsystems von 51.1% auf 53.1% erhöht. Da die KVA im gekoppelten Zustand keinen Strom mehr produziert und den Eigenbedarf importieren muss, wird der elektrische Wirkungsgrad negativ. Dadurch erhält man ebenfalls eine Verschlechterung bei der KVA beim R1-Faktor. Dieser reduziert sich von 0.98 auf 0.89.

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA UNGEKOPPELT                                   | KVA   | GUD   |
|--|-------|-------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                   | 59.1% | 49.8% |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUVVO bzw. mit Gasturbine und Kessel | 86.0% | 89.0% |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                         | 65.8% | 37.5% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                      | 18.0% | 49.8% |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)  | 41.1% | 0.0%  |
| Anlagenstromkennzahl brutto  | 0.44  | -     |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                    | 56.2% | 48.8% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                        | 15.1% | 48.8% |
| Anlagenstromkennzahl netto   | 0.37  | -     |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                           | 0.98  | -     |

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA GEKOPPELT                                     | KVA   | GUD   |
|--|-------|-------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                   | 82.9% | 58.2% |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUVVO bzw. mit Gasturbine und Kessel | 85.7% | 88.3% |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                         | 92.2% | 54.1% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                      | 0.0%  | 43.7% |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)  | 82.9% | 14.5% |
| Anlagenstromkennzahl brutto  | 0     | 3.02  |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                    | 80.0% | 57.2% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                        | -2.9% | 42.7% |
| Anlagenstromkennzahl netto   | -0.03 | 2.95  |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                           | 0.89  | -     |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA UNGEKOPPELT                                 |              |
|--|--------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                         | 52.7%        |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)            | 39.8%        |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                                  | 12.9%        |
| Anlagenstromkennzahl brutto  | 3.1          |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                          | 51.1%        |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)              | 38.3%        |
| Anlagenstromkennzahl netto   | 2.98         |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD          | 415.9 kg/MWh |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA          | 541.8 kg/MWh |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA | 459.2 kg/MWh |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA GEKOPPELT                                   |              |
|--|--------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                         | 54.7%        |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)            | 41.9%        |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                                  | 12.9%        |
| Anlagenstromkennzahl brutto  | 3.26         |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                          | 53.1%        |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)              | 40.3%        |
| Anlagenstromkennzahl netto   | 3.13         |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD          | 254.4 kg/MWh |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA          | 359.4 kg/MWh |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA | 442.1 kg/MWh |

Tabelle 6: Resultate Variante A "Tandem" gekoppelt und ungekoppelt



Die Erhöhung der elektrischen Bruttoleistung beider Anlagen beträgt relativ zur totalen Stromerzeugung beider Anlagen etwa 5%.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der Anstieg der gesamten Stromerzeugung, auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz. Die KVA-Anlage benötigt jedoch einen Kondensator und eine Dampfreduzierstation zum Kondensator für den Fall, dass das GuD-Kraftwerk eine plötzliche Schutzabschaltung erfährt oder nicht verfügbar ist.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD-Kraftwerk

## 5.2 Variante B „Zustupf“

### 5.2.1 GuD GT26 ungekoppelt

Bei Variante B wird im GuD-Kraftwerk die Gasturbine des Modells ALSTOM GT26 vorgesehen. Die GT26 wird von ALSTOM POWER gebaut und geliefert. Die GT26 ist eine Gasturbine schwerer Bauart (Heavy Duty) und wird mit Erdgas betrieben. Der Gasturbosatz hat eine Nennleistung von 280 MW und einen elektrischen Wirkungsgrad von 37.3%. Es ist zu bemerken, dass die Firma ALSTOM POWER die Daten der zuletzt entwickelten und im Testlauf erfolgreichen Ausbaustufe aus Wettbewerbsgründen nicht nennen wollte. Deshalb entsprechen die in dieser Studie berücksichtigten Gasturbinen-Daten nicht dem neuesten Stand.

Das GuD-Kraftwerk besteht aus 1 Gasturbosatz, dessen Abgase in einen ungefeuerten 3-Druck-Abhitze-kessel mit einfacher Zwischenüberhitzung geführt werden. Eine Zusatzfeuerung im AHK ist infolge der heissen Gasturbinen-Abgase von ca. 619°C nicht notwendig. Aufgrund der Optimierung wird ein ungefeuerter AHK vorgesehen.

Die Rauchgas-Temperatur vor Kamin beträgt auch dank eines rauchgasbeheizten Speisewasservorwärmers, dessen aufgewärmtes Speisewasser als Heizmedium des Entgasers verwendet wird, bei Nennleistung 75°C.

Die Frischdampf-Zustände betragen auf der HD-Seite 141 bar / 565°C, die heisse Zwischenüberhitzung hat 29 bar / 565°C und auf der ND-Seite sind es 5 bar / 286°C.

Die Dampfturbine weist die folgenden isentropen Wirkungsgrade auf: HD-DT = 88.4%, MD-DT = 94.0%, ND-DT = 93.0%, Kondensations-DT = 88.6%.

Der Kondensationsdampf wird in einem luftgekühlten Kondensator (LUKO) kondensiert. Dabei wurde eine jahresdurchschnittliche Umgebungstemperatur von 9°C angenommen. Gemäss LUKO-Hersteller wurde ein für diesen Anwendungsfall realistisches Vakuum von 54 mbar angenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das wirtschaftliche Optimum dieses Vakuums von den Energiepreisen, insbesondere dem Elektrizitätspreis abhängig ist. Je tiefer die Elektrizitätspreise, desto schlechter wird das Optimum des Vakuumswertes (höherer Abdampfdruck).

Die 30 MW Nutzwärmeleistung wird aus der Dampfturbine als Entnahmedampf mit einem Druck von 6 bar entnommen.

Als Entgaser wird ein Vakuum-Entspanner mit einer Speisewassertemperatur von 60°C vorgesehen.

| <b>Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt</b>                                  |  |
|---|--|
| GUD-Kraftwerk mit GT26; 1 GT auf 1 Kessel auf 1 DT; nicht gekoppelt mit KVA |  |
| Kraftwerksname  | KA 26-1 (CCH 320)                                  |
| Gasturbinen Konfiguration   | ALSTOM GT26 DryLowEmission - neu u. sauber         |
| Dampferzeuger Konfig.   | 3-Druck ZUE Abhitzedampferzeuger ungefeuert        |
| Dampfturbinen Konfig.   | Entnahme-Kondensations-Dampfturbine ohne Getriebe  |
| Kaltes Ende   | Luftkondensator                                    |
| Nutzwärmeauskopplung  | <i>Prozessdampfversorgung nicht in Betrieb</i>     |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"   | GT = 100% Last; Prozessdampf-Nutzwärmeleistung = 0 |
| <b>Anlagen-Leistungsdaten</b>   |  |
| Nenn-Frischdampferzeugung   | 316.8 t/h  |
| Nenn-Prozessdampflieferung  | 0.0 t/h  |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto  | 0.0 kW   |
| An KVA-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto                            | 0.0 kW   |
| Elektrische Bruttogleistung Gasturbosatz                                    | 279385.3 kW  |
| Elektrische Bruttogleistung Dampfturbosatz                                  | 159907.5 kW  |
| Totale elektrische Bruttogleistung  | 439292.9 kW  |
| Betriebseigenverbrauch elektrisch   | 6396.3 kW  |
| Totale elektrische Nettogleistung   | 432896.6 kW  |
| Feuerungswärmeleistung Dampferzeuger  | <i>nicht vorhanden</i>                             |
| Totale Feuerungswärmeleistung   | 743921.6 kW  |
| Von KVA-Anlage erhaltene Wärmeleistung                                      | 0.0 kW   |

Tabelle 7: Leistungsdaten GuD GT26

### 5.2.2 GuD GT26 gekoppelt mit KVA

Abbildung 5 zeigt das Schema der GT26 gekoppelt mit der KVA. Dabei wird das Speisewasser im AHK des GuD vorgewärmt und zur KVA geleitet. Der Kessel der KVA erzeugt Frischdampf mit 42 bar und 420°C. Dieser Dampf wird in die kalte Zwischenüberhitzung des GuD-Dampfprozesses hinzugegeben. Der KVA-Dampf wird vor Einspeisung auf den Druck der kalten ZUE entspannt. Anschliessend wird der gemeinsame Dampf im ZUE auf 565°C erwärmt bevor dieser über die Dampfturbine verstromt wird.

Die GuD-Gasturbine soll immer laufen, weil bei Nicht-Verfügbarkeit der GuD-Gasturbine die KVA-Dampfmenge nicht ausreicht, um damit die GuD-Dampfturbine überhaupt oder nur schon sinnvoll betreiben zu können. In diesem Fall müsste die KVA- Frischdampfmenge über eine Reduzierstation und einem Kondensator in der KVA-Anlage entsorgt werden.

Dies würde bedeuten dass das GuD-Kraftwerk in dieser Kopplung in Grundlast betrieben werden soll.





durch die Erhöhung der Dampfmenge beim Zwischenüberhitzer mittels KVA-Dampf mehr Energie aus dem Gasturbinenabgas herausgenommen wird. Damit steht dem Verdampfer weniger Wärme zur Verfügung.

| Anlagen- Leistungsdaten GuD plus KVA ungekoppelt           | ungekoppelt | gekoppelt  |
|--|-------------|------------|
| Nenn-Frischdampferzeugung GuD (mit KVA-Frischdampf)        | 316.8 t/h   | 302.8 t/h  |
| Nenn-Prozessdampflieferung                                 | 43.6 t/h    | 44.1 t/h   |
| Totale Prozessdampf-Nutzwärmeleistung (Netto) GuD plus KVA | 30'000 kW   | 30'000 kW  |
| Totale elektrische Bruttoleistung GuD plus KVA             | 452'431 kW  | 453'767 kW |
| Totaler Betriebseigenverbrauch elektrisch GuD plus KVA     | 8'507 kW    | 8'672 kW   |
| Totale elektrische Nettoleistung GuD plus KVA              | 443'924 kW  | 445'096 kW |
| Totale Feuerungswärmeleistung GuD plus KVA                 | 816'942 kW  | 816'942 kW |
| CO2-Emissionen GuD   | 155.4 t/h   | 155.4 t/h  |
| CO2-Emissionen KVA   | 22.2 t/h    | 22.2 t/h   |
| Totale CO2-Emissionen GuD plus KVA                         | 177.6 t/h   | 177.6 t/h  |

**Tabelle 8: Leistungsdaten GuD GT26 mit KVA gekoppelt**

Auch bei den Kenndaten sind die Veränderungen gering. Der Brennstoffnutzungsgrad, wie auch der elektrische Wirkungsgrad nehmen durch die Kopplung lediglich um 0.2%-Punkte zu.

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA UNGEKOPPELT                                  | KVA   | GUD   |
|---|-------|-------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                  | 59.1% | 59.1% |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUV0 bzw. mit Gasturbine und Kessel | 86.0% | 94.5% |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                        | 65.8% | 37.7% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                     | 18.0% | 59.1% |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)   | 41.1% | 0.0%  |
| Anlagenstromkennzahl brutto   | 0.44  | -     |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                   | 56.2% | 58.2% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                       | 15.1% | 58.2% |
| Anlagenstromkennzahl netto  | 0.37  | -     |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                          | 0.98  | -     |

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA GEKOPPELT                                    | KVA   | GUD    |
|---|-------|--------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                  | 84.7% | 60.2%  |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUV0 bzw. mit Gasturbine und Kessel | 86.0% | 94.6%  |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                        | 93.9% | 42.4%  |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                     | 0.0%  | 56.2%  |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)   | 84.7% | 4.0%   |
| Anlagenstromkennzahl brutto   | 0     | 14.01  |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                   | 82.4% | 589.3% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                       | -2.2% | 55.3%  |
| Anlagenstromkennzahl netto  | -0.03 | 13.8   |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                          | 0.91  | -      |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA UNGEKOPPELT                      |               |
|---|---------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto              | 59.1%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto) | 55.4%         |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                       | 3.7%          |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                     | 15.08         |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto               | 58.0%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)   | 54.3%         |
| Anlagenstromkennzahl netto                                      | 14.8          |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD            | 358.87 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA            | 541.80 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA   | 374.70 kg/MWh |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA GEKOPPELT                        |               |
|---|---------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto              | 59.2%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto) | 55.5%         |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                       | 3.7%          |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                     | 15.13         |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto               | 58.2%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)   | 54.5%         |
| Anlagenstromkennzahl netto                                      | 14.84         |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD            | 324.21 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA            | 357.71 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA   | 373.78 kg/MWh |

**Tabelle 9: Resultate Variante B "Zustupf" gekoppelt und ungekoppelt**



Die Erhöhung der elektrischen Bruttoleistung beider Anlagen ist relativ zur totalen Stromerzeugung gesehen klein, relativ zur Stromerzeugung der ungekoppelten KVA-Anlage beträgt er jedoch fast 9%.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der relativ gesehen kleine Anstieg der gesamten Stromerzeugung, aber auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz. Die KVA-Anlage benötigt jedoch einen Kondensator und eine Dampfreduzierstation zum Kondensator für den Fall, dass das GuD-Kraftwerk eine plötzliche Schutzabschaltung erfährt oder nicht verfügbar ist, bis eine möglicherweise vorhandene KVA-Dampfturbine angefahren ist.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD-Kraftwerk.

### 5.3 Variante C „Heizteam“

#### 5.3.1 GuD Heizkraftwerk ungekoppelt

Bei Variante C wird im reinen GuD-Heizkraftwerk die Gasturbine des Modells SIEMENS SGT300 oder SOLAR Taurus T70 oder KAWASAKI GPB80D vorgesehen. Im Folgenden wird die Anlage mit der Gasturbine von SIEMENS durchgerechnet. Die SGT300 ist eine Industrie-Gasturbine und wird mit Erdgas betrieben. Der Gasturbosatz hat eine Nennleistung von 7.6 MW und einen elektrischen Wirkungsgrad von 33.9%.

Das GuD-Heizkraftwerk besteht aus 1 Gasturbosatz, dessen Abgase in einen leistungsgefeuerten 1-Druck-Strahlungskessel ohne Zwischenüberhitzung geführt werden. Die Leistungsfeuerung im Strahlungskessel wird aufgrund des Designs des GuD-Heizkraftwerkes und der Kesselanlage benötigt.

Die Rauchgas-Temperatur vor Kamin beträgt bei Nennleistung 117°C.

Die Frischdampf-Zustände betragen auf der HD-Seite 88 bar / 502°C.

Die Dampfturbine weist die folgenden isentropen Wirkungsgrade auf:  $\eta = 88.5\%$ .

Sämtlicher erzeugter Dampf wird als Nutzwärme oder als Kraftwerks-Eigenbedarfsdampf benötigt. Es ist keine Kondensations-Dampfturbine vorgesehen.

Die 48 MW Nutzwärmeleistung wird aus der Dampfturbine als Gegendruckdampf mit einem Druck von 6 bar geliefert.

Als Entgaser wird ein üblicher atmosphärischer Entspanner mit einer Speisewassertemperatur von 105°C vorgesehen.

| <b>Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt GuD</b>                              |  |
|---|--|
| GuD Heizkraftwerk ohne Kondensationsprozess; nicht gekoppelt mit KVA-Anlage |  |
| Kraftwerksname  | CCR-K 70   |
| Gasturbinen Konfiguration   | SOLAR TaurusT70 DryLowEmission - neu u. sauber     |
| Dampferzeuger Konfig.   | 1-Druck Strahlungsdampferzeuger Erdgas gefeuert    |
| Dampfturbinen Konfig.   | Gegendruck-Dampfturbine mit Getriebe               |
| Kaltes Ende   | <i>nicht vorhanden</i>                             |
| Nutzwärmeauskopplung  | Erzeugter Abdampf dient zur Prozessdampfversorgung |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"   | GT = 100% Last; max. Kesselfeuerung auf 3 Vol-% O2 |
| <b>Anlagen-Leistungsdaten</b>   |  |
| Nenn-Frischdampferzeugung   | 73.1 t/h   |
| Nenn-Prozessdampflieferung  | 70.3 t/h   |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto  | 47700.0 kW   |
| An KVA-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto                            | 0.0 kW   |
| Elektrische Bruttoleistung Gasturbosatz                                     | 7625.1 kW  |
| Elektrische Bruttoleistung Dampfturbosatz                                   | 11007.0 kW   |
| Totale elektrische Bruttoleistung   | 18632.0 kW   |
| Betriebseigenverbrauch elektrisch   | 440.3 kW   |
| Totale elektrische Nettogleistung   | 18191.8 kW   |
| Feuerungswärmeleistung Dampferzeuger  | 49322.2 kW   |
| Totale Feuerungswärmeleistung   | 71787.2 kW   |
| Von KVA-Anlage erhaltene Wärmeleistung                                      | 0.0 kW   |

Tabelle 10: Leistungsdaten GuD HKW

### 5.3.2 GuD Heizkraftwerk gekoppelt mit KVA

Abbildung 6 zeigt die gekoppelte Variante der KVA mit dem Heizkraftwerk. Dabei wird das Speisewasser ebenfalls im Strahlungskessel des GuD-Kraftwerks vorgewärmt. Zurück in der KVA wird überhitzter Dampf mit 420°C erzeugt und fördert diesen wieder zum GuD-Kraftwerk. Dort wird zusammen mit dem Dampf des GuD-Kraftwerks die Temperatur auf 502°C erhöht, bevor man diesen über die Turbine verstromt. Die Turbine entspannt den Dampf bis auf 6 bar. In einem anschliessenden Produktionsprozess oder Heizkondensator kann die gesamte Kondensationsenergie für die Prozessindustrie sowie Fernwärme genutzt werden.

Die gesamte Prozessdampf-Nutzwärmeleistung bleibt gemäss Aufgabenstellung sowohl für die gekoppelte als auch für die ungekoppelte Schaltungsvariante gleich (78 MW).

Das Erhöhen der Prozessdampfversorgung im GuD-Kraftwerk von 48 MW in ungekoppelter Version auf 78 MW in gekoppelter Version führt zu einer Reduktion der elektrischen Bruttoleistung, wobei natürlich die Prozessdampfversorgung in der KVA-Anlage abgeschaltet wird, um die Summe der Prozessdampf-Nutzwärmeleistungen gleich zu behalten.



Die totale Prozessdampf-Nutzwärmeleistung im GuD-Heizkraftwerk bestimmt zusammen mit dem Gesamtwirkungsgrad GuD, wieviel Input-Wärmeleistung das GuD-Heizkraftwerk benötigt.

Die KVA liefert dabei einen Teil in Form von Wärmeenergie (KVA-Frischdampf – KVA-Speisewasser).

Das Gasturbinen-Modell bleibt gleich wie beim Referenz-GuD-Heizkraftwerk, da ein kleineres GT-Modell die Prozessdampfversorgung ohne KVA-Frischdampf nicht liefern könnte. Das Gasturbinen-Modell bestimmt nun den abgasseitigen Wärmeleistungs-Input in den GuD-Dampferzeuger.

Die Feuerungswärmeleistung des GuD-Dampferzeugers wird nun soweit zurückgeregelt, dass die geforderte Prozessdampf-Nutzwärmeleistung erbracht wird.

Wie man aus dem Vergleich mit der ungekoppelten Variante sieht, geht die Feuerungswärmeleistung des GuD-Dampferzeugers in der gekoppelten Variante deutlich zurück.

Eine Kopplung und damit ein Verzicht des KVA-Kondensationsprozesses führt zu einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades beider gekoppelten Anlagen.

Als Folge davon geht die Erdgas-Feuerungswärmeleistung zurück und damit wird fossile Primärenergie eingespart.

Ebenfalls geht die erzeugte elektrische Leistung zurück, weil der Dampfteil des KVA-Kondensationsprozesses nun nicht mehr auf Kondensationsdruck entspannt wird sondern nur noch auf Gegendruck-Niveau.

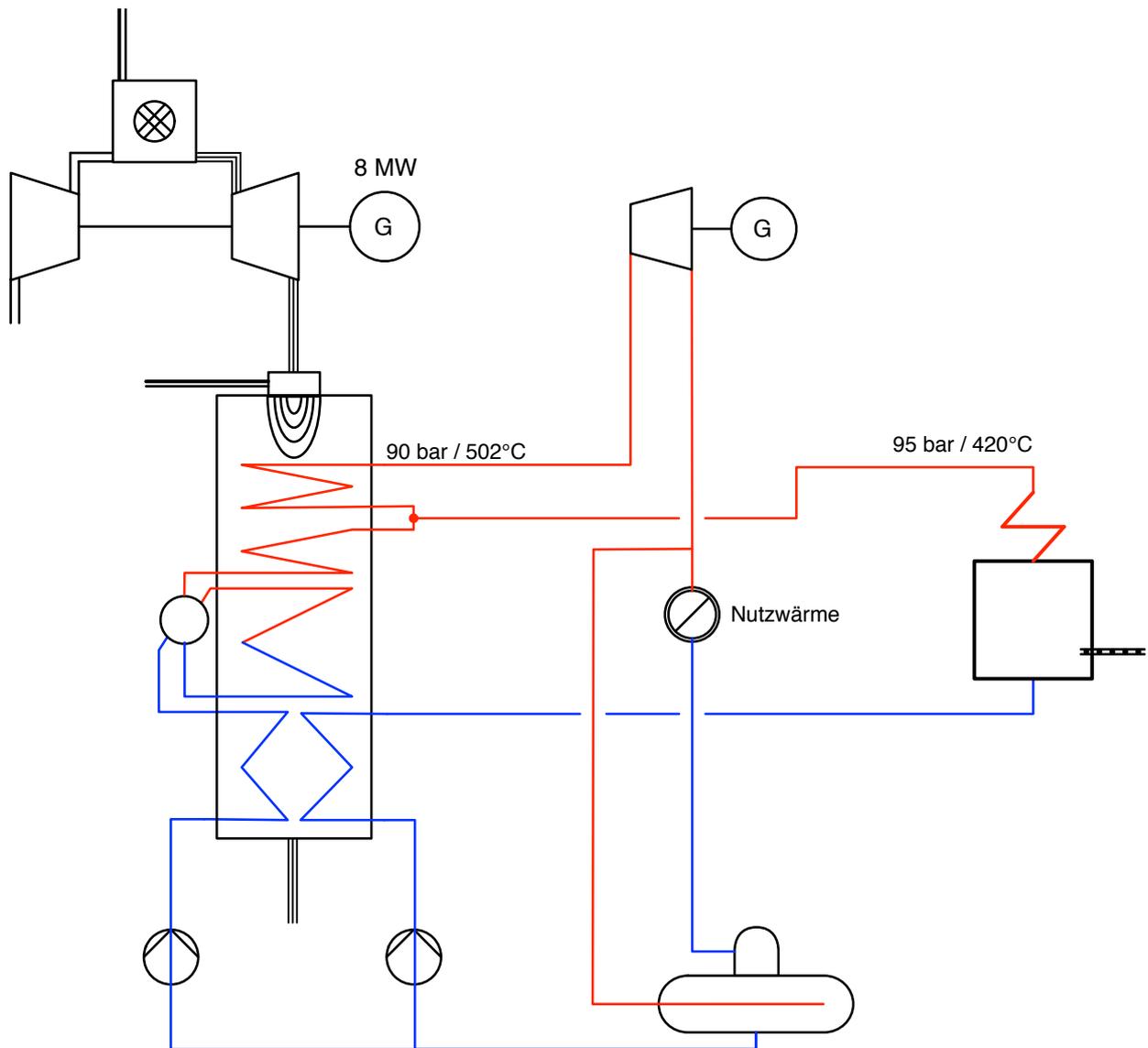


Abbildung 5: Schema gekoppelt GuD HKW und KVA

### 5.3.3 Resultate

Durch die Kopplung der Anlagen nimmt die Stromproduktion bei gleichbleibendem Nutzwärmeabsatz um 4.87 MW ab. Gleichzeitig nimmt aber auch die Feuerungswärmeleistung um 23.2 MW ab. Dies zeigt sich deutlich in der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche sich um 4.8 t/h auf 32.1 t/h vermindern.

| Anlagen- Leistungsdaten GuD plus KVA gekoppelt             | ungekoppelt | gekoppelt  |
|--|-------------|------------|
| Nenn-Frischdampferzeugung GuD (mit KVA-Frischdampf)        | 73.1 t/h    | 123.8 t/h  |
| Nenn-Prozessdampflieferung                                 | 113.9 t/h   | 115.3 t/h  |
| Totale Prozessdampf-Nutzwärmeleistung (Netto) GuD plus KVA | 77'700 kW   | 77'700 kW  |
| Totale elektrische Bruttoleistung GuD plus KVA             | 31'770 kW   | 26'894 kW  |
| Totaler Betriebseigenverbrauch elektrisch GuD plus KVA     | 2'551 kW    | 2'556 kW   |
| Totale elektrische Nettoleistung GuD plus KVA              | 29'219 kW   | 24'338 kW  |
| Totale Feuerungswärmeleistung GuD plus KVA                 | 144'807 kW  | 121'606 kW |
| CO2-Emissionen GuD   | 14.6 t/h    | 9.9 t/h    |
| CO2-Emissionen KVA   | 22.2 t/h    | 22.2 t/h   |
| Totale CO2-Emissionen GuD plus KVA                         | 36.9 t/h    | 32.1 t/h   |

Tabelle 11: Leistungsdaten GuD Heizkraftwerk mit KVA gekoppelt

Auch bei den Kenndaten ist die Primärenergieeinsparung deutlich sichtbar. Bei dieser Variante nimmt der Brennstoffnutzungsgrad netto von 73.8% auf 83.9% zu. Somit erreicht diese Kopplung den mit Abstand höchsten Brennstoffnutzungsgrad.

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA UNGEKOPPELT                                  | KVA   | GUD   |
|---|-------|-------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                  | 59.1% | 92.4% |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUVO bzw. mit Gasturbine und Kessel | 86.0% | 93.9% |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                        | 65.8% | 98.2% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                     | 18.0% | 26.0% |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)   | 41.1% | 66.4% |
| Anlagenstromkennzahl brutto   | 0.44  | 0.39  |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                   | 56.2% | 91.8% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                       | 15.1% | 25.3% |
| Anlagenstromkennzahl netto  | 0.37  | 0.38  |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                          | 0.98  | -     |

| Einzelne Anlagen-Kenndaten GuD und KVA GEKOPPELT                                    | KVA   | GUD   |
|---|-------|-------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto                                  | 84.6% | 95.2% |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUVO bzw. mit Gasturbine und Kessel | 86.0% | 91.8% |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                        | 93.9% | 98.6% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto)                     | 0.0%  | 23.9% |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)   | 84.6% | 71.2% |
| Anlagenstromkennzahl brutto   | 0     | 0.34  |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto                                   | 82.4% | 94.4% |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)                       | -2.9% | 23.2% |
| Anlagenstromkennzahl netto  | -0.03 | 0.33  |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)                          | 0.91  | -     |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA UNGEKOPPELT                      |               |
|---|---------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto              | 75.6%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto) | 21.9%         |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                       | 53.7%         |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                     | 0.41          |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto               | 73.8%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)   | 20.2%         |
| Anlagenstromkennzahl netto                                      | 0.38          |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD            | 222.17 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA            | 541.80 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA   | 344.82 kg/MWh |

| Anlagen-Kenndaten GuD plus KVA GEKOPPELT                        |               |
|---|---------------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto              | 86.0%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto) | 22.1%         |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                       | 63.9%         |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                     | 0.35          |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto               | 83.9%         |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)   | 20.0%         |
| Anlagenstromkennzahl netto                                      | 0.31          |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD            | 93.37 kg/MWh  |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie KVA            | 357.87 kg/MWh |
| Spezifische CO2-Emissionen pro Netto-Nutzenergie GuD plus KVA   | 315.00 kg/MWh |

Tabelle 12: Resultate Variante C "Tandem" gekoppelt und ungekoppelt

Durch die Kopplung wird die Feuerungswärmeleistung von fossilem Brennstoff um 23.2 MW und die elektrische Bruttoleistung um 4.9 MW vermindert.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der effizientere fossile Primärbrennstoffeinsatz mit entsprechender Umweltschonung.

Die Höhe der erzeugten elektrischen Leistung ist dabei bedingt durch die Höhe des Nutzwärmebedarfes und natürlich durch den Brennstoffnutzungsgrad des Heizkraftwerkes.

Auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz. Die KVA-Anlage benötigt jedoch einen Kondensator und eine Dampfreduzierstation zum Kondensator für den Fall, dass das GuD-Kraftwerk eine plötzliche Schutzabschaltung erfährt oder nicht verfügbar ist.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD-Kraftwerk.

## 6 Übersicht der Resultate

### 6.1 Leistungsdaten aller Varianten

Nachfolgend die Zusammenstellung einzelner Leistungsdaten:

|                                     |                  | Variante A<br>"Tandem" | Variante B<br>"Trittbrettfahrer" | Variante C<br>"Heizteam" |
|-------------------------------------|------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Elektrische<br/>Nettleistung</b> | Ungekoppelt      | 89.3 MW                | 443.9 MW                         | 29.2 MW                  |
|                                     | Gekoppelt        | 93.9 MW                | 445.1 MW                         | 24.3 MW                  |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>4.6 MW</b>          | <b>1.2 MW</b>                    | <b>-4.9 MW</b>           |
| <b>Feuerungs-<br/>wärmeleistung</b> | Ungekoppelt      | 233.2 MW               | 816.9 MW                         | 144.8 MW                 |
|                                     | Gekoppelt        | 233.2 MW               | 816.9 MW                         | 121.6 MW                 |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>0.0 MW</b>          | <b>0.0 MW</b>                    | <b>-23.2 MW</b>          |
| <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>    | Ungekoppelt      | 54.8 t/h               | 177.6 t/h                        | 36.9 t/h                 |
|                                     | Gekoppelt        | 54.8 t/h               | 177.6 t/h                        | 32.1 t/h                 |
|                                     | <b>Differenz</b> | <b>0.0 t/h</b>         | <b>0.0 t/h</b>                   | <b>-4.7 t/h</b>          |

Tabelle 13: Übersicht Leistungsdaten aller Varianten



## 6.2 Spezifische Kenndaten aller Varianten

Nachfolgend die Zusammenstellung ausgewählter Kenndaten:

|  |                  | Variante A<br>"Tandem" | Variante B<br>"Trittbrettfahrer" | Variante C<br>"Heizteam" |
|--|------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Brennstoff-<br/>nutzungsgrad netto</b>                                    | Ungekoppelt      | 51.1%                  | 58.0%                            | 73.8%                    |
|  | Gekoppelt        | 53.1%                  | 58.2%                            | 83.9%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>2.0%</b>            | <b>0.2%</b>                      | <b>10.1%</b>             |
| <b>Elektrischer<br/>Wirkungsgrad</b>   | Ungekoppelt      | 38.3%                  | 54.3%                            | 20.2%                    |
|  | Gekoppelt        | 40.3%                  | 54.5%                            | 20.0%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>2.0%</b>            | <b>0.2%</b>                      | <b>-0.2%</b>             |
| <b>Wärmewirkungsgrad</b>   | Ungekoppelt      | 12.9%                  | 3.7%                             | 73.8%                    |
|  | Gekoppelt        | 12.9%                  | 3.7%                             | 83.9%                    |
|  | <b>Differenz</b> | <b>0.0%</b>            | <b>0.0%</b>                      | <b>10.1%</b>             |
| <b>Spezifische CO<sub>2</sub>-<br/>Emissionen pro Netto-<br/>Nutzenergie</b> | Ungekoppelt      | 459 kg/MWh             | 375 kg/MWh                       | 345 kg/MWh               |
|  | Gekoppelt        | 442 kg/MWh             | 374 kg/MWh                       | 315 kg/MWh               |
|  | <b>Differenz</b> | <b>-17.2 kg/MWh</b>    | <b>-0.9 kg/MWh</b>               | <b>-29.8 kg/MWh</b>      |

Tabelle 14: Übersicht spezifische Kenndaten aller Varianten

## 7 Fazit und Empfehlungen

### 7.1 Effekte durch die Kopplung

#### Variante A „Tandem“

Die Erhöhung der elektrischen Bruttoleistung beider Anlagen beträgt relativ zur totalen Stromerzeugung beider Anlagen etwa 5%.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der Anstieg der gesamten Stromerzeugung, auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD-Kraftwerk.

#### Variante B „Zustupf“

Die Erhöhung der elektrischen Bruttoleistung beider Anlagen ist relativ zur totalen Stromerzeugung gesehen klein (0.2%-Punkte), relativ zur Stromerzeugung der ungekoppelten KVA-Anlage beträgt er jedoch fast 9%.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der relativ gesehen kleine Anstieg der gesamten Stromerzeugung, aber auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD

#### Variante C „Heizteam“

Durch die Kopplung wird die Feuerungswärmeleistung von fossilem Brennstoff um 16% relativ und die elektrische Bruttoleistung um 16.7% relativ reduziert. In der untersuchten Variante wird durch die Kopplung 23 MW Primärenergie eingespart und 4.9 MW weniger Elektrizität erzeugt (20% von 23 MW). Für den Fall, dass diese Strommindererzeugung in einem reinen Stromerzeugungs-GuD-Kraftwerk kompensiert würde, müssten lediglich 8.2 MW (4.9 dividiert durch 0.6) Primärenergie aufgewendet werden.

Der Nutzen dieser Kopplung ist also der effizientere fossile Primärbrennstoffeinsatz mit entsprechender Umweltschonung.

Auf der anderen Seite benötigt die KVA-Anlage keinen eigenen Dampfturbosatz.

Die Kopplung bedingt jedoch die zusätzlichen Investitionskosten für die 4 Fernleitungen zwischen KVA-Anlage und GuD-Kraftwerk.

### 7.2 Empfehlung hinsichtlich Kopplung

Die Empfehlungen zu den einzelnen Varianten hängen auch mit der Höhe des Nutzwärmebedarfs und seiner Jahresganglinie ab.



Falls kein relevanter Nutzwärmebedarf vorhanden ist, dann ist die Variante A nicht empfehlenswert. In diesem Fall wäre Variante B die bevorzugte. Dies liegt an der Höhe des elektrischen Wirkungsgrades.

Bemerkung: Variante C würde es bei diesem Anwendungsfall gar nicht geben.

#### **Variante A „Tandem“**

Aus Sicht der KVA ist, aufgrund der Stromproduktionssteigerung durch die Kopplung, diese Variante zu bevorzugen. Allerdings ist zu beachten, dass der Brutto-Brennstoffnutzungsgrad der beiden gekoppelten Anlagen mit 55% am tiefsten von allen drei Varianten ist.

#### **Variante B „Zustupf“**

Diese Variante ist dann empfehlenswert, wenn das GuD-Kraftwerk am gleichen Standort wie die KVA gebaut wird und das GuD-Kraftwerk in Grundlast betrieben wird.

Bemerkung: Die Empfehlung bezieht sich rein auf die Kopplung und nicht auf das GuD-Kraftwerk selbst. Wenn also die Kopplung nicht betrachtet wird und wenn es um reine Elektrizitätserzeugung mit dem Brennstoff Erdgas gehen würde, dann wäre unter Umständen dieses ungekoppelte GuD-Kraftwerk empfehlenswert.

#### **Variante C „Heizteam“**

Aus Landessicht ist im Rahmen der Deckung des Nutzwärme potentials diese Variante zu bevorzugen. Der Grund liegt bei der Erreichung des höchsten Brennstoffnutzungsgrades und der höchsten Primärenergieeinsparung.

### **7.3 Realisierbarkeit**

Bemerkung: Das Thema Teillastverhalten wird in Kapitel 8 beschrieben.

#### **Variante A „Tandem“**

Die Kopplung ist mit vertretbarem Aufwand realisierbar, falls der Nutzwärmebedarf im Umkreis der KVA besteht und falls der KVA-Betreiber den Betrieb mit einem Verdampfendruck von 113 bar akzeptiert. Dies bedeutet eine Verdampfungstemperatur von 320°C, was auf der Rauchgasseite zu einem erhöhten Verschleiss führen kann. Bei der Referenz-KVA beträgt die Verdampfungstemperatur knapp 260°C.

Die verfügbaren Informationen aus dem Ausland deuten darauf hin, dass der Verschleiss bei betriebsgemässer Ausführung durchaus akzeptabel ist.

#### **Variante B „Zustupf“**

Bei dieser Kopplungsart muss die GuD-Gasturbine immer laufen, weil bei Nicht-Verfügbarkeit der GuD-Gasturbine die KVA-Dampfmenge nicht ausreicht, um damit die GuD-Dampfturbine betreiben zu können.

In diesem Fall müsste die KVA-Frischdampfmenge über eine Reduzierstation und einem Kondensator in der KVA-Anlage entsorgt werden.

Falls eine Grundlasterzeugung aus GuD-Kraftwerken aus politischen Gründen gefordert ist und so der evtl. wirtschaftlich ineffiziente Dauerbetrieb der Gasturbine (rund 8000 Jahresbetriebsstunden über ca. 10-20 Jahre) garantiert wird, hat die KVA die nötige Sicherheit, um die Koppelung zu realisieren.

Diese Empfehlung betrifft nicht das Thema, ob ein GuD-Kraftwerk als Mittel- oder Spitzenlastkraftwerk wirtschaftlich empfehlenswert ist.

Aufgrund der Erfahrungen in Deutschland und anderen Ländern ist zu erwarten, dass ein grosses Stromerzeugungs-GuD-Kraftwerk bei einem moderaten oder tiefen Energiepreisverhältnis Strom zu Erdgas nicht als Grundlastkraftwerk betrieben werden wird sondern als Mittellast- oder Spitzenlast-Kraftwerk (bis einmal oder mehrmals tägliches Abstellen und Anfahren), weil aufgrund des teuren Brennstoffs Erdgas der Betrieb eines GuD-Kraftwerks bei tiefen Strompreisen nicht wirtschaftlich ist.

Allein zur Deckung der Brennstoffkosten bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 60% müsste das Energiepreisverhältnis 1.7 (1 dividiert durch 0.6) betragen.

Wenn im Rahmen der Energiewende Strom aus alternativen Energien oder WKK-Anlagen per Gesetz mit Priorität in die Netze eingespeisen wird und wenn diese Anlagen finanziell gefördert werden, dann ist ein Grundlastbetrieb eines reinen Stromerzeugungs-GuD-Kraftwerkes wirtschaftlich unattraktiv.

Auch wenn eine Absicht für einen Grundlastbetrieb des GuD-Kraftwerks besteht, wäre wegen den energiepolitischen Vorgaben und möglichen Markteingriffen eine Kopplung zwischen einem rein wirtschaftlichkeitsorientierten GuD-Kraftwerk und einer KVA mit grossen Risiken verbunden.

### **Variante C „Heizteam“**

Diese gekoppelte Variante benötigt einen Nutzwärmebedarf von 78 MW gegenüber 30 MW der beiden anderen Varianten. Die Realisierbarkeit dieser Variante hängt davon ab, ob die Nutzwärme abgenommen werden kann.

Beim GuD handelt sich um eine reine WKK- Anlage ohne Kondensationsdampfturbine. Die erzeugte Dampfmenge hängt vom Nutzwärmebedarf ab. Deshalb bestimmt der Nutzwärmebedarf zusammen mit der Anlagenstromkennzahl letztlich die Höhe der Stromproduktion.

## **7.4 Empfehlungen für die Standortsuche neuer KVA**

Aus Sicht der Kopplung müssten für die Standortwahl die folgenden Fragen beantwortet werden:

1. Besteht ein Nutzwärmebedarf in der Höhe >50 MW → Variante C „Heizteam“  
Erreichung des maximalen Brennstoffnutzungsgrad
2. Ist ein Grundlast-GuD-Kraftwerk vorhanden / geplant → Variante B „Zustupf“  
Zunahme von fast 10% Stromproduktion für die KVA
3. Ansonsten: Kopplung an KVA-Standort → Variante A „Tandem“  
Höchste Strommehrproduktion aus Sicht der KVA



## 8 Weitergehende Fragestellungen

### 8.1 Noch nicht beantwortete Fragen in den untersuchten Kopplungsmodellen

Die folgenden Punkte waren nicht Bestandteil der vorliegenden Studie und müssten für eine vertiefte Betrachtung noch weiter ausgearbeitet werden:

- Betriebscharakteristik der gekoppelten Systeme
- Betriebsweise bei Teillast einer der beiden Anlagen
- Effekte, wenn Teile der Anlagen oder eine ganze Anlage überhaupt nicht verfügbar sind
- Einfluss des zu erwartenden Lastgangs beim Nutzwärmebedarf (Spitzenbezug, schlagartiger Stopp des Bezugs etc.)

Die in der Studie erarbeiteten Kraftwerksmodelle sind – nach entsprechenden Anpassungen – in der Lage, solche Fragen zu beantworten.

### 8.2 Variation der Kopplungsmodelle könnte weitere Optimierung bringen

Um den Studiumumfang in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurde bereits zu Beginn eine Vorauswahl von 3 Szenarien für die Kopplung einer KVA mit einem GuD-Kraftwerk getroffen. Diese wurden mit den vermutet sinnvollsten Kopplungsarten modelliert. Damit kamen drei verschiedene Kopplungsarten bei verschiedenen Anlagen zur Anwendung. Konsequenterweise müsste mit den jetzt vorliegenden Modellen untersucht werden, welche Kopplungsart bei welchem GuD-Typ die optimalsten Ergebnisse erzielt. Aufgrund unserer Erfahrung ist davon auszugehen, dass die Variation der Kopplung (Dampfdruck) sich bei den drei verschiedenen GuD-Kraftwerken auch ungleich verhalten wird. Wir vermuten noch Optimierungspotential.

### 8.3 Variation des Standes der Technik in der KVA

Als letzter Punkt gilt zu erwähnen, dass in der Studie nur eine (1) Referenz-KVA mit konventioneller und bereits heute möglicher Technik mit einer vergleichsweise hohen Energieeffizienz ( $R1 = 0.98$ ) betrachtet wurde. Nicht untersucht wurden

- Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen der KVA-Technologie zum Beispiel hinsichtlich der Feuerungsart oder möglicherweise der Rauchgasreinigung, die Einfluss auf Rauchgastemperatur und Gesamt-Luftüberschuss haben
- Kopplungseffekt einer durchschnittlichen Schweizer Anlage ( $R1 = 0.72$ ) oder eher ineffizienten Anlage ( $R1 = 0.5$ ).

### 8.4 Grundlagen für fundierte Entscheide treffen

Gerade der Umstand, dass in der frisch eingeweihten ewb Energiezentrale Bern-Forsthaus zwar eine KVA gleich neben einem GuD-Heizkraftwerk steht, der Dampfkreislauf jedoch getrennt gehalten wurde, zeigt auf, dass in der Schweiz die Grundlagen für solche Optimierungsüberlegungen zu wenig klar dokumentiert sind. Offenbar fiel bereits in einem relativ frühen Projektierungsstadium ein Entscheid, die Kopplung nicht weiterzuverfolgen, da eine höhere Komplexität der Gesamtanlage abzusehen war.

Hier wäre eine solide Aufarbeitung der oben genannten Themenbereiche (z.B. im Rahmen einer Forschungsarbeit mit Partnern aus der Wissenschaft) eine sehr wichtige Massnahme, um das Wissen zur Effizienzoptimierung in der thermischen Stromerzeugung zu dokumentieren und zu steigern.

## 9 Vorschlag zum weiteren Vorgehen

Suche nach Standorten mit Nutzwärmebedarf >50 MW in der Schweiz zur Potentialabschätzung der Kopplungsart nach Muster „Heizteam“.

Da mit Gegenargumenten zu betrieblichen Auswirkungen der vorgeschlagenen Kopplungsvarianten gerechnet werden muss, schlagen wir vor, entsprechende Betreibererfahrungen zu sammeln, zu klären und aufzubereiten. Dafür bieten sich an:

- „Heizteam“: Papier- und Kartonfabrik Varel (Kopplung mit Spitzen- bzw. Reservedampferzeugung), Norddeutschland
- „Zustupf“: MHKW Mainz (aktuell in Diskussion ob Grundlast-GuD-Kraftwerk weitergeführt werden kann)
- „Tandem“: Zabalgarbi, Bilbao (Betreibererfahrungen aus mehreren Jahren, >90 bar)
- KVA Amsterdam, (allgemein hoher Frischdampfdruck (>90 bar))

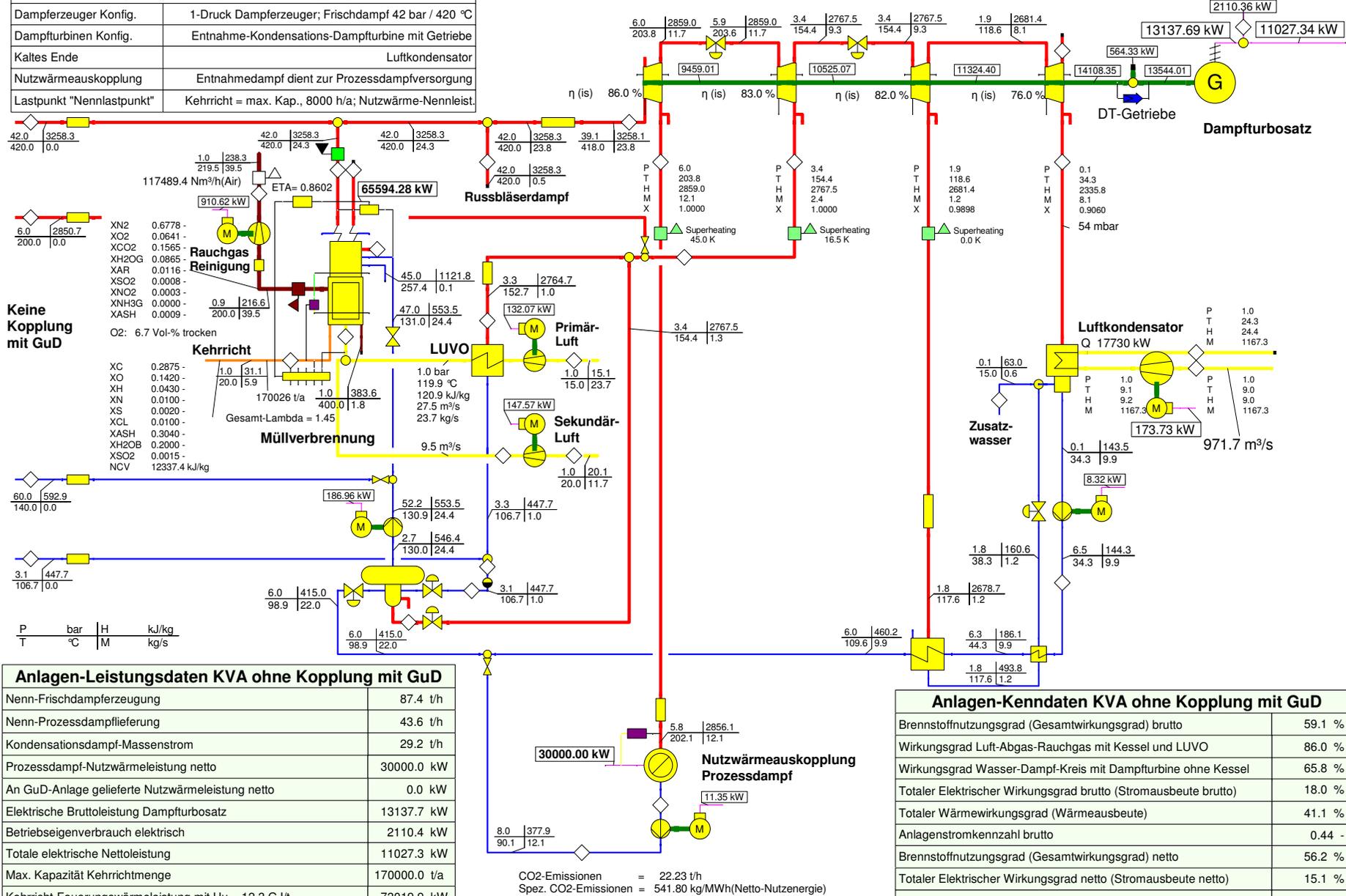


## Anhang 1: Epsilon-Simulation Referenz- KVA



# Kehrrichtverbrennungsanlage mit Frischdampf 42bar-420°C; ohne Kopplung mit GuD-Kraftwerk

| Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt KVA                                       |   |
|---|---|
| Kehrrichtverbrennungsanlage mit Dampfturbine; ohne Kopplung mit GuD-Kraftwerk |   |
| Dampferzeuger Konfig.   | 1-Druck Dampferzeuger; Frischdampf 42 bar / 420 °C    |
| Dampfturbinen Konfig.   | Entnahme-Kondensations-Dampfturbine mit Getriebe      |
| Kaltes Ende   | Luftkondensator                                       |
| Nutzwärmeauskopplung  | Entnahmedampf dient zur Prozessdampfversorgung        |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"   | Kehrricht = max. Kap., 8000 t/a; Nutzwärme-Nennleist. |



| Anlagen-Leistungsdaten KVA ohne Kopplung mit GuD    |              |
|---|--------------|
| Nenn-Frischdampferzeugung                           | 87.4 t/h     |
| Nenn-Prozessdampflieferung                          | 43.6 t/h     |
| Kondensationsdampf-Massenstrom                      | 29.2 t/h     |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto                | 30000.0 kW   |
| An GuD-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto    | 0.0 kW       |
| Elektrische Bruttoleistung Dampfturbosatz           | 13137.7 kW   |
| Betriebsseigenverbrauch elektrisch                  | 2110.4 kW    |
| Totale elektrische Nettoleistung                    | 11027.3 kW   |
| Max. Kapazität Kehrrichtmenge                       | 170000.0 t/a |
| Kehrricht-Feuerungswärmeleistung mit Hu = 12.3 GJ/t | 73019.9 kW   |
| Von GuD-Anlage erhaltene Wärmeleistung              | 0.0 kW       |

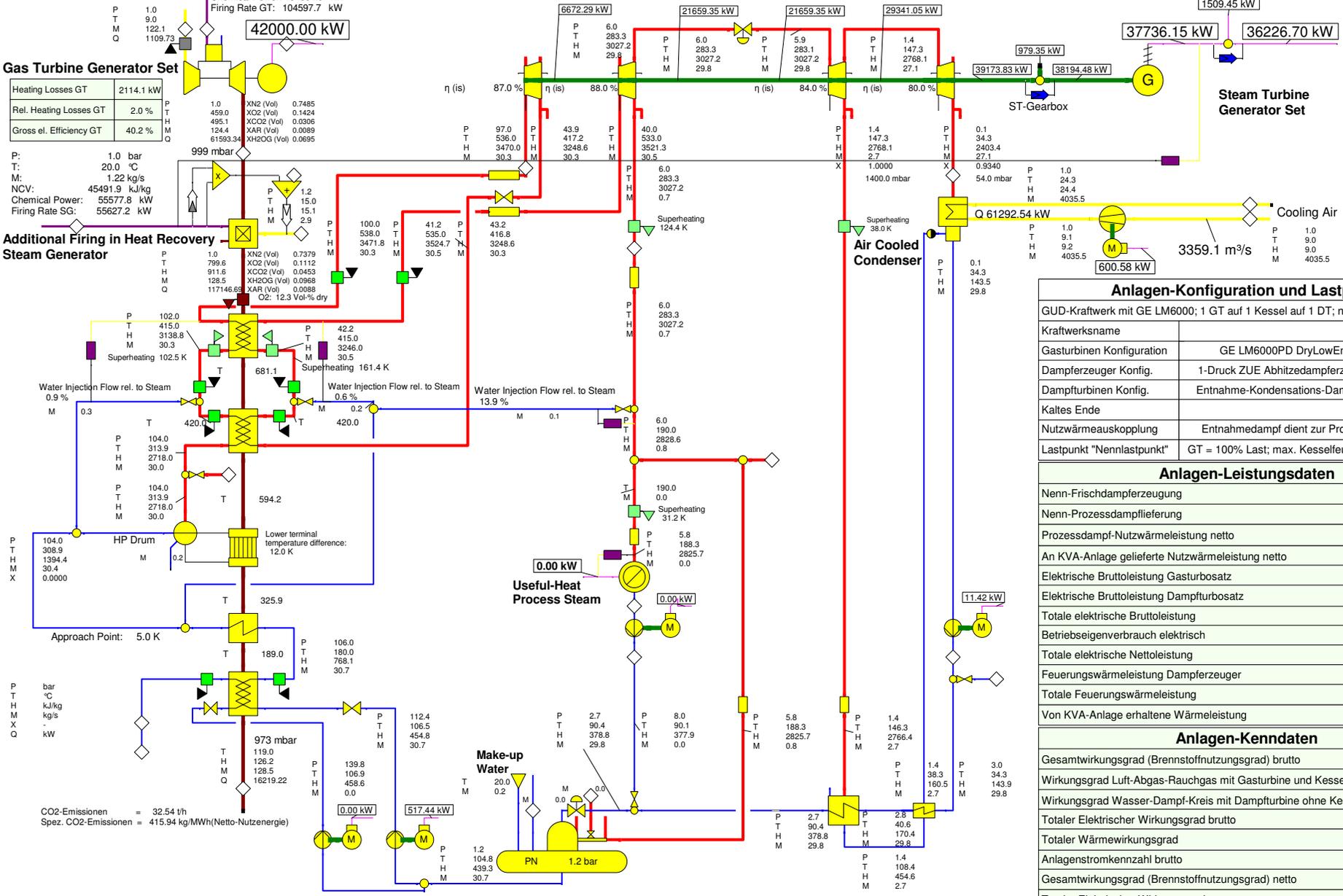
| Anlagen-Kenndaten KVA ohne Kopplung mit GuD                     |        |
|---|--------|
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) brutto              | 59.1 % |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Kessel und LUVO            | 86.0 % |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel    | 65.8 % |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto (Stromausbeute brutto) | 18.0 % |
| Totaler Wärmewirkungsgrad (Wärmeausbeute)                       | 41.1 % |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                     | 0.44 - |
| Brennstoffnutzungsgrad (Gesamtwirkungsgrad) netto               | 56.2 % |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto (Stromausbeute netto)   | 15.1 % |
| Anlagenstromkennzahl netto                                      | 0.37 - |
| R1-Faktor im Nennlastpunkt (nach EU-Richtlinie 2008_98_EG)      | 0.98 - |

## Anhang 2: Epsilon-Simulation Referenz GuD-Kraftwerk mit LM6000

# GuD-Kraftwerk mit Gasturbine GE LM6000PD - Gasturbine mit 1-Druck ZUE Abhitzekeessel 100bar-538°C und Entnahme-Kondensations-Dampfturbine

Ambient Temperature: 9.0 °C  
 Ambient Rel. Humidity: 78 %  
 Ambient Pressure: 973 mbar  
 corresponding to 1013 mbar at 0 m.a.s.l.

P: 48.0 bar  
 T: 20.0 °C  
 M: 2.30 kg/s  
 NCV: 45491.9 kJ/kg  
 Chemical Power: 104504.9 kW  
 Firing Rate GT: 104597.7 kW



P: 1.0 bar  
 T: 20.0 °C  
 M: 1.22 kg/s  
 NCV: 45491.9 kJ/kg  
 Chemical Power: 55577.8 kW  
 Firing Rate SG: 55627.2 kW

Water Injection Flow rel. to Steam: 0.9 %  
 Water Injection Flow rel. to Steam: 0.6 %  
 Water Injection Flow rel. to Steam: 13.9 %

CO<sub>2</sub>-Emissionen = 32.54 t/h  
 Spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen = 415.94 kg/MWh(Netto-Nutzenergie)

| Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt  |  |
|--|--|
| GUD-Kraftwerk mit GE LM6000; 1 GT auf 1 Kessel auf 1 DT; nicht gekoppelt mit KVA |  |
| Kraftwerksname   | CCS-K 110  |
| Gasturbinen Konfiguration  | GE LM6000PD DryLowEmission - neu u. sauber         |
| Dampferzeuger Konfig.  | 1-Druck ZUE Abhitzedampferzeuger Erdgas gefeuert   |
| Dampfturbinen Konfig.  | Entnahme-Kondensations-Dampfturbine mit Getriebe   |
| Kaltes Ende  | Luftkondensator                                    |
| Nutzwärmeauskopplung   | Entnahmedampf dient zur Prozessdampfversorgung     |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"  | GT = 100% Last; max. Kesselfeuerung adiabat=800 °C |

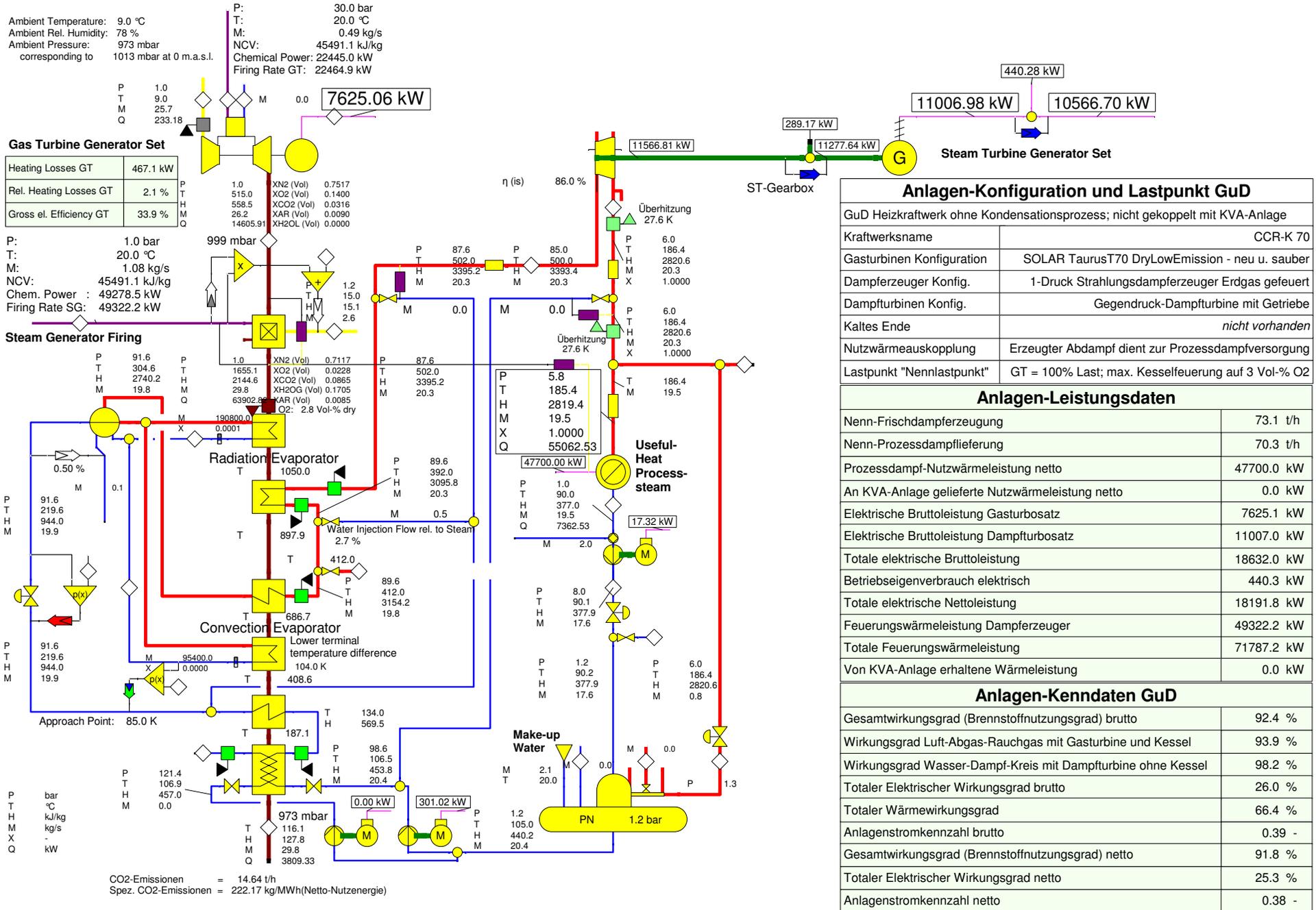
| Anlagen-Leistungsdaten                           |             |
|--|-------------|
| Nenn-Frischdampferzeugung                        | 109.1 t/h   |
| Nenn-Prozessdampflieferung                       | 0.0 t/h     |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto             | 0.0 kW      |
| An KVA-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto | 0.0 kW      |
| Elektrische Bruttoleistung Gasturbosatz          | 42000.0 kW  |
| Elektrische Bruttoleistung Dampfturbosatz        | 37736.2 kW  |
| Totale elektrische Bruttoleistung                | 79736.2 kW  |
| Betriebseigenverbrauch elektrisch                | 1509.4 kW   |
| Totale elektrische Nettoleistung                 | 78226.7 kW  |
| Feuerungswärmeleistung Dampferzeuger             | 55627.2 kW  |
| Totale Feuerungswärmeleistung                    | 160224.9 kW |
| Von KVA-Anlage erhaltene Wärmeleistung           | 0.0 kW      |

| Anlagen-Kenndaten  |             |
|--|-------------|
| Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffnutzungsgrad) brutto           | 49.8 %      |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Gasturbine und Kessel   | 89.0 %      |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel | 37.5 %      |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad brutto                     | 49.8 %      |
| Totaler Wärmewirkungsgrad                                    | 0.0 %       |
| Anlagenstromkennzahl brutto                                  | 16434578.88 |
| Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffnutzungsgrad) netto            | 48.8 %      |
| Totaler Elektrischer Wirkungsgrad netto                      | 48.8 %      |
| Anlagenstromkennzahl netto                                   | 16123463.92 |

## Anhang 3: Epsilon-Simulation Referenz-GuD-Heizkraftwerk



# GuD-Heizkraftwerk mit höchstem Brennstoffnutzungsgrad - Gasturbine mit 1-Druck Strahlungsdampferzeuger 88bar-502°C und Gegendruck-Dampfturbine



| Anlagen-Konfiguration und Lastpunkt GuD                                     |  |
|---|--|
| GuD Heizkraftwerk ohne Kondensationsprozess; nicht gekoppelt mit KVA-Anlage |  |
| Kraftwerksname  | CCR-K 70   |
| Gasturbinen Konfiguration   | SOLAR TaurusT70 DryLowEmission - neu u. sauber     |
| Dampferzeuger Konfig.   | 1-Druck Strahlungsdampferzeuger Erdgas gefeuert    |
| Dampfturbinen Konfig.   | Gegendruck-Dampfturbine mit Getriebe               |
| Kaltes Ende   | nicht vorhanden                                    |
| Nutzwärmeauskopplung  | Erzeugter Abdampf dient zur Prozessdampfversorgung |
| Lastpunkt "Nennlastpunkt"   | GT = 100% Last; max. Kesselfeuerung auf 3 Vol-% O2 |
| Anlagen-Leistungsdaten  |  |
| Nenn-Frischdampferzeugung   | 73.1 t/h   |
| Nenn-Prozessdampflieferung  | 70.3 t/h   |
| Prozessdampf-Nutzwärmeleistung netto  | 47700.0 kW   |
| An KVA-Anlage gelieferte Nutzwärmeleistung netto                            | 0.0 kW   |
| Elektrische Bruttoleistung Gasturbosatz                                     | 7625.1 kW  |
| Elektrische Bruttoleistung Dampfturbosatz                                   | 11007.0 kW   |
| Totale elektrische Bruttoleistung   | 18632.0 kW   |
| Betriebseigenverbrauch elektrisch   | 440.3 kW   |
| Totale elektrische Nettoleistung  | 18191.8 kW   |
| Feuerungswärmeleistung Dampferzeuger  | 49322.2 kW   |
| Totale Feuerungswärmeleistung   | 71787.2 kW   |
| Von KVA-Anlage erhaltene Wärmeleistung                                      | 0.0 kW   |
| Anlagen-Kenndaten GuD   |  |
| Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffnutzungsgrad) brutto                          | 92.4 %   |
| Wirkungsgrad Luft-Abgas-Rauchgas mit Gasturbine und Kessel                  | 93.9 %   |
| Wirkungsgrad Wasser-Dampf-Kreis mit Dampfturbine ohne Kessel                | 98.2 %   |
| Totale Elektrischer Wirkungsgrad brutto                                     | 26.0 %   |
| Totale Wärmewirkungsgrad  | 66.4 %   |
| Anlagenstromkennzahl brutto   | 0.39 -   |
| Gesamtwirkungsgrad (Brennstoffnutzungsgrad) netto                           | 91.8 %   |
| Totale Elektrischer Wirkungsgrad netto                                      | 25.3 %   |
| Anlagenstromkennzahl netto  | 0.38 -   |

## Anhang 4: Sankey Diagramme

### Referenz KVA

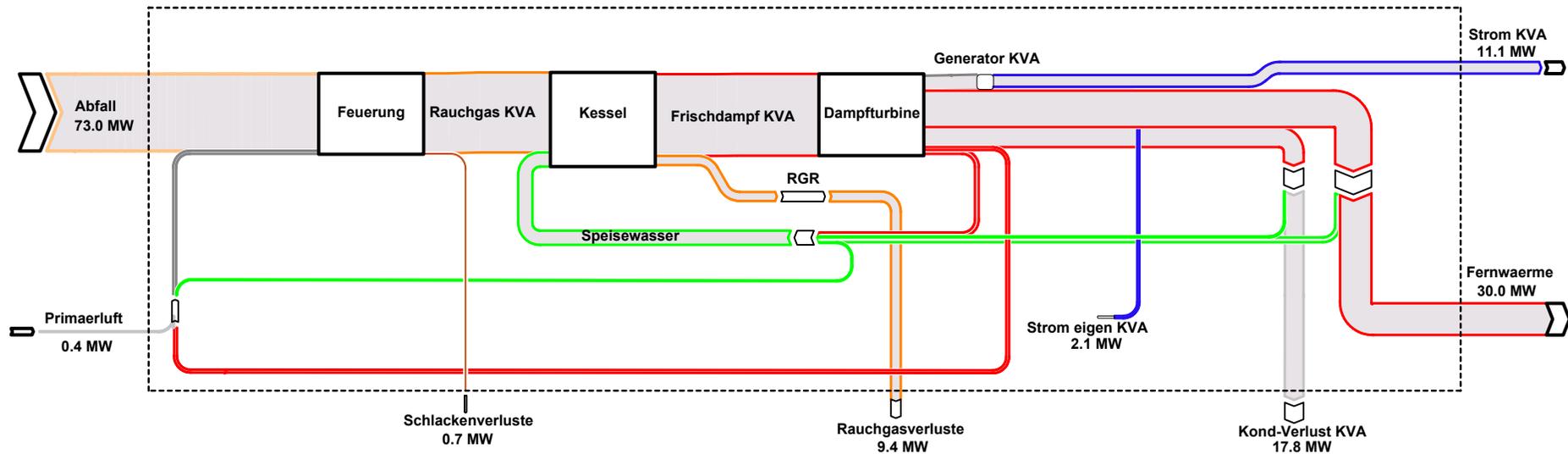


Abbildung 6: Sankey Referenz-KVA

### Sankey Diagramm GuD LM6000

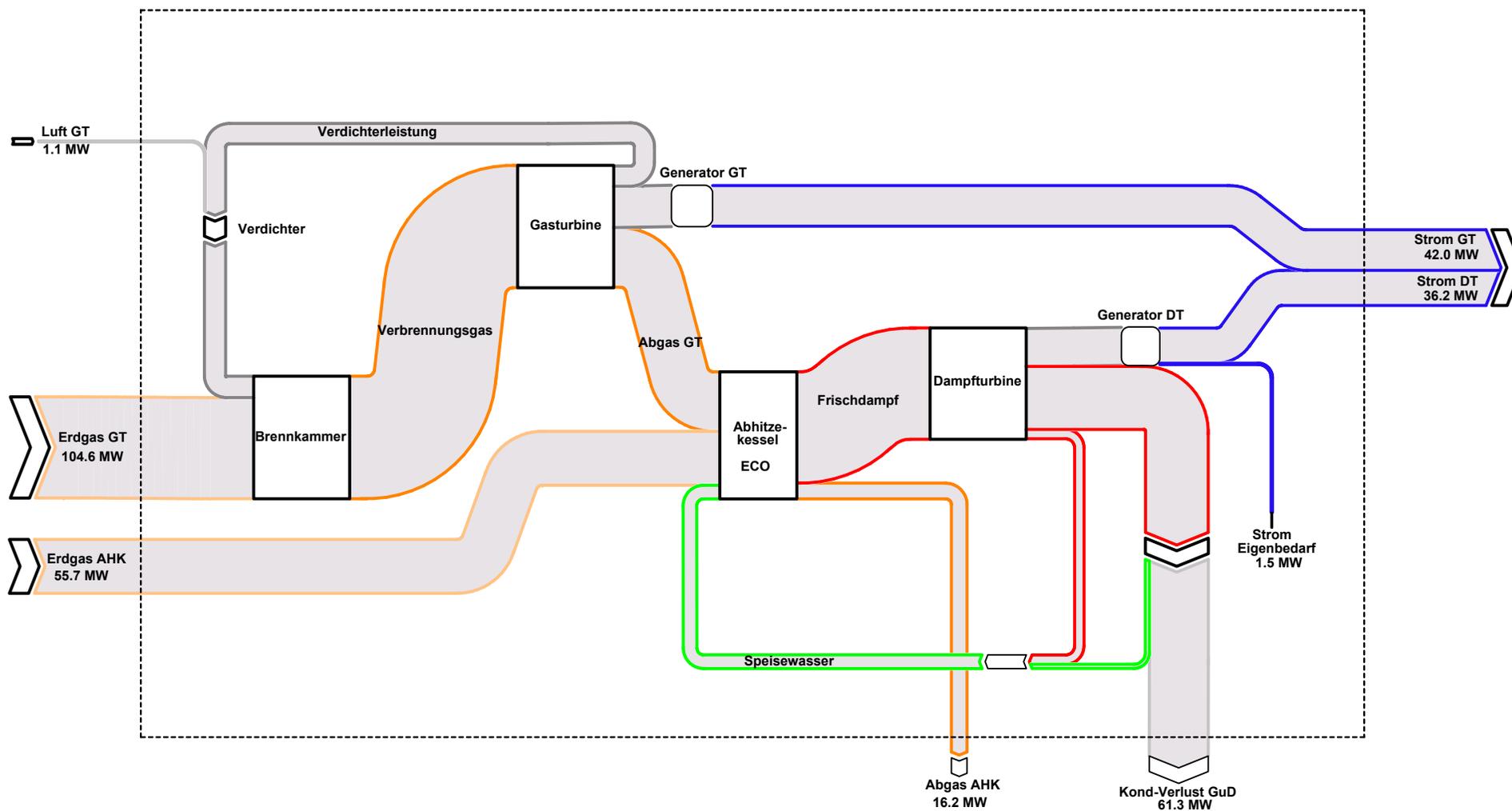


Abbildung 7: Sankey GuD LM6000

### Sankey Diagramm GuD LM6000 gekoppelt mit KVA

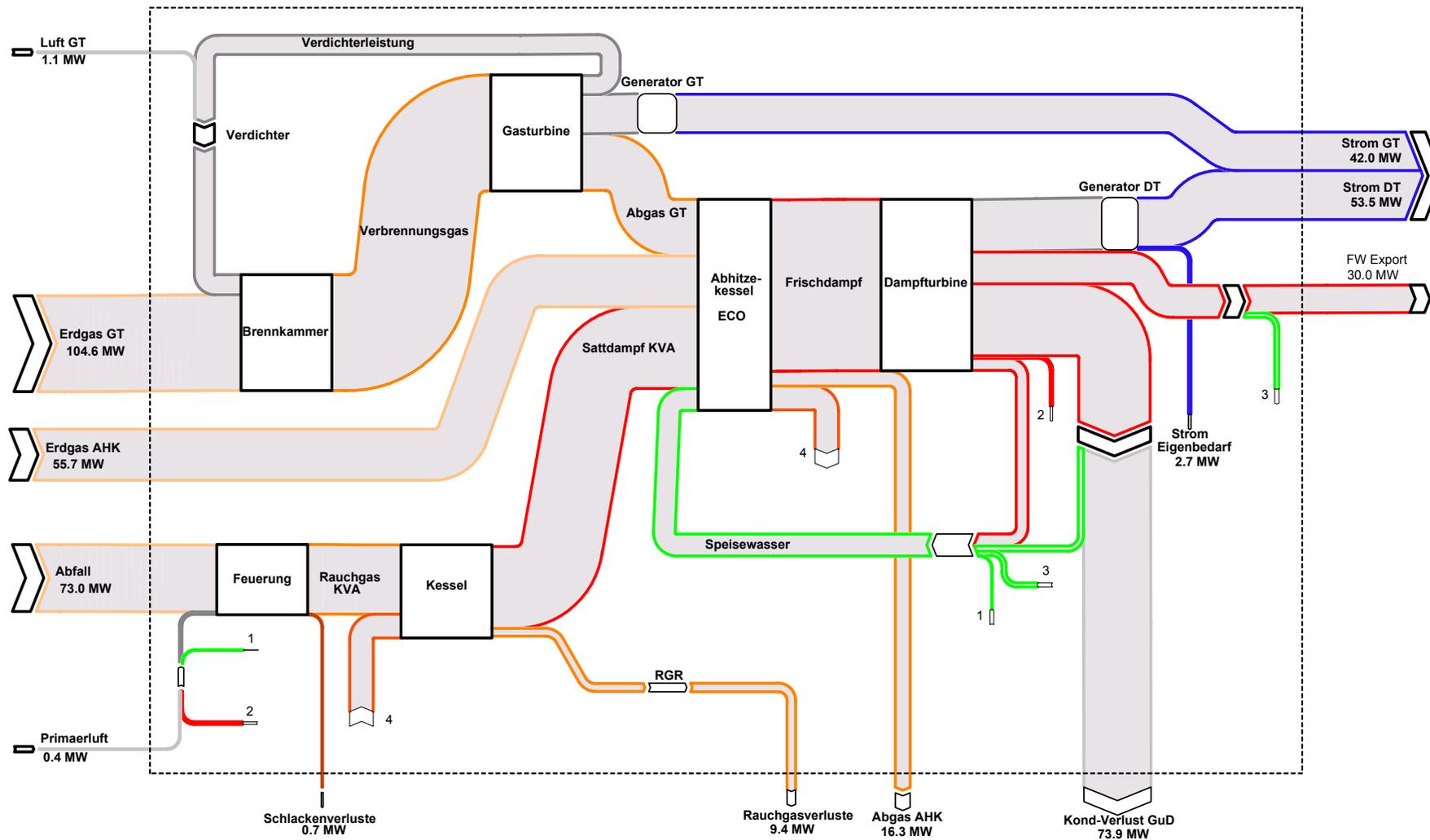


Abbildung 8: Sankey GuD LM6000 gekoppelt mit KVA

### Sankey Diagramm GuD GT26

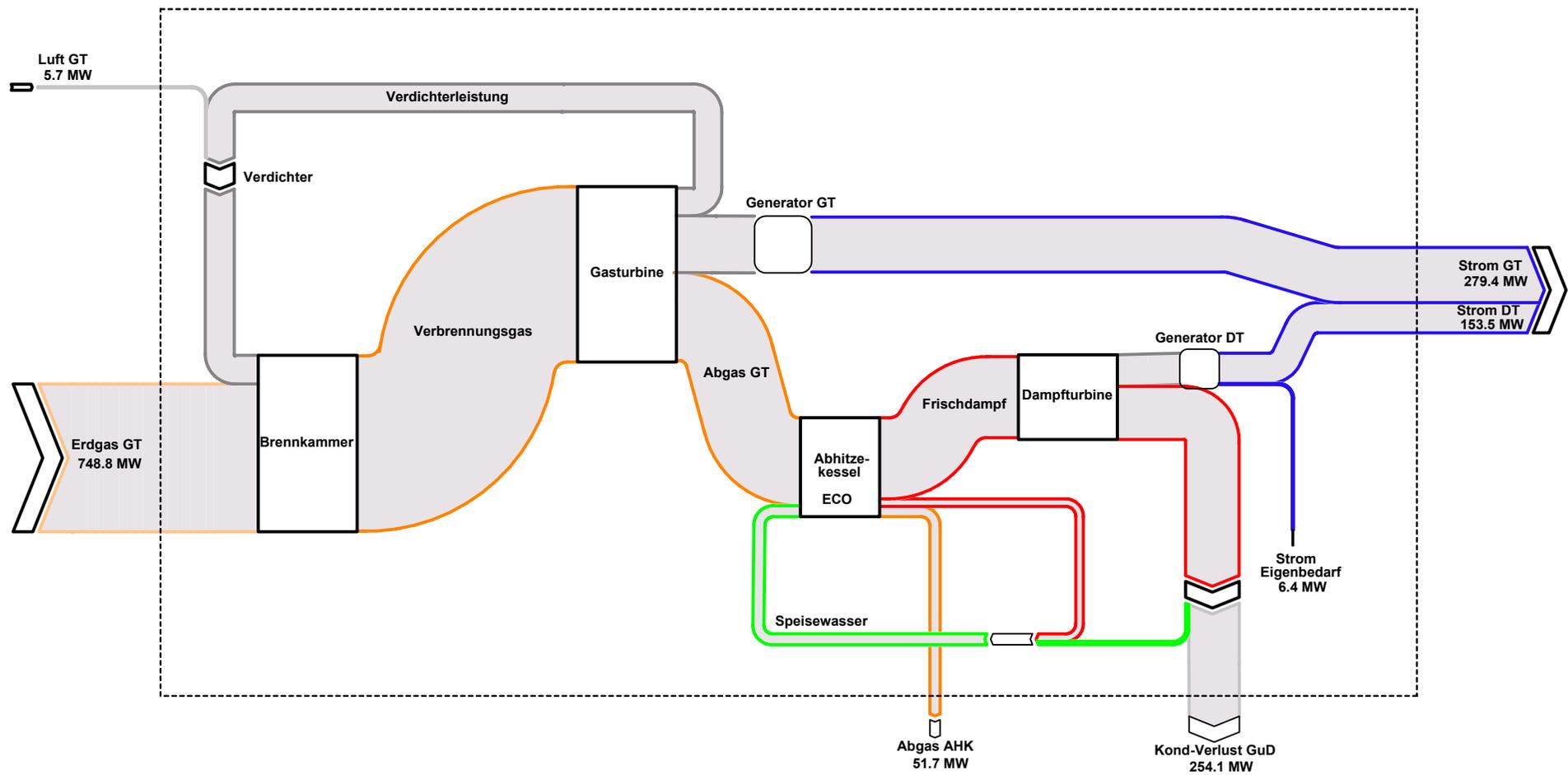


Abbildung 9: Sankey GuD GT26

### Sankey Diagramm GT26 gekoppelt mit KVA

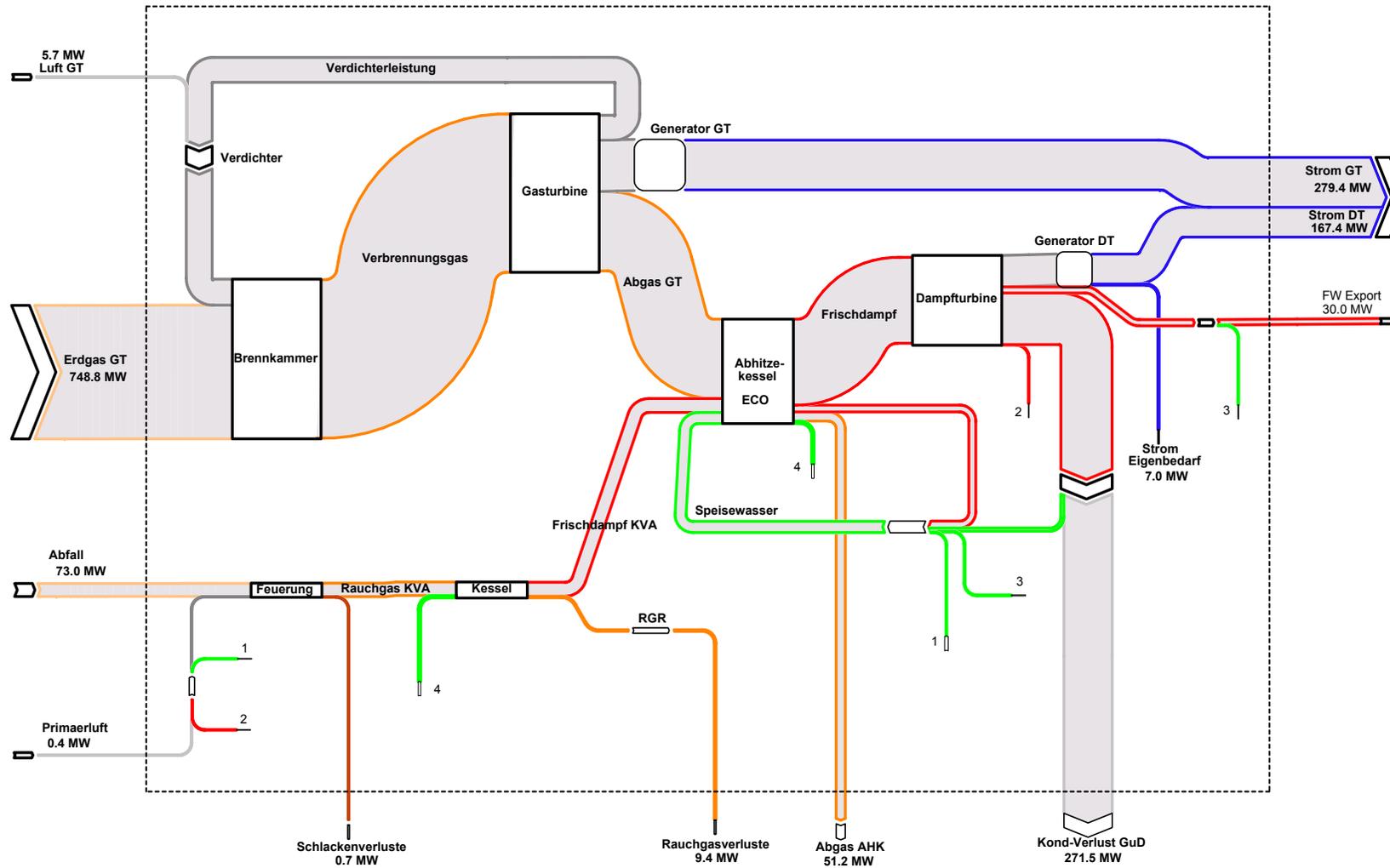


Abbildung 10: Sankey Diagramm GT26 gekoppelt mit KVA

### Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk

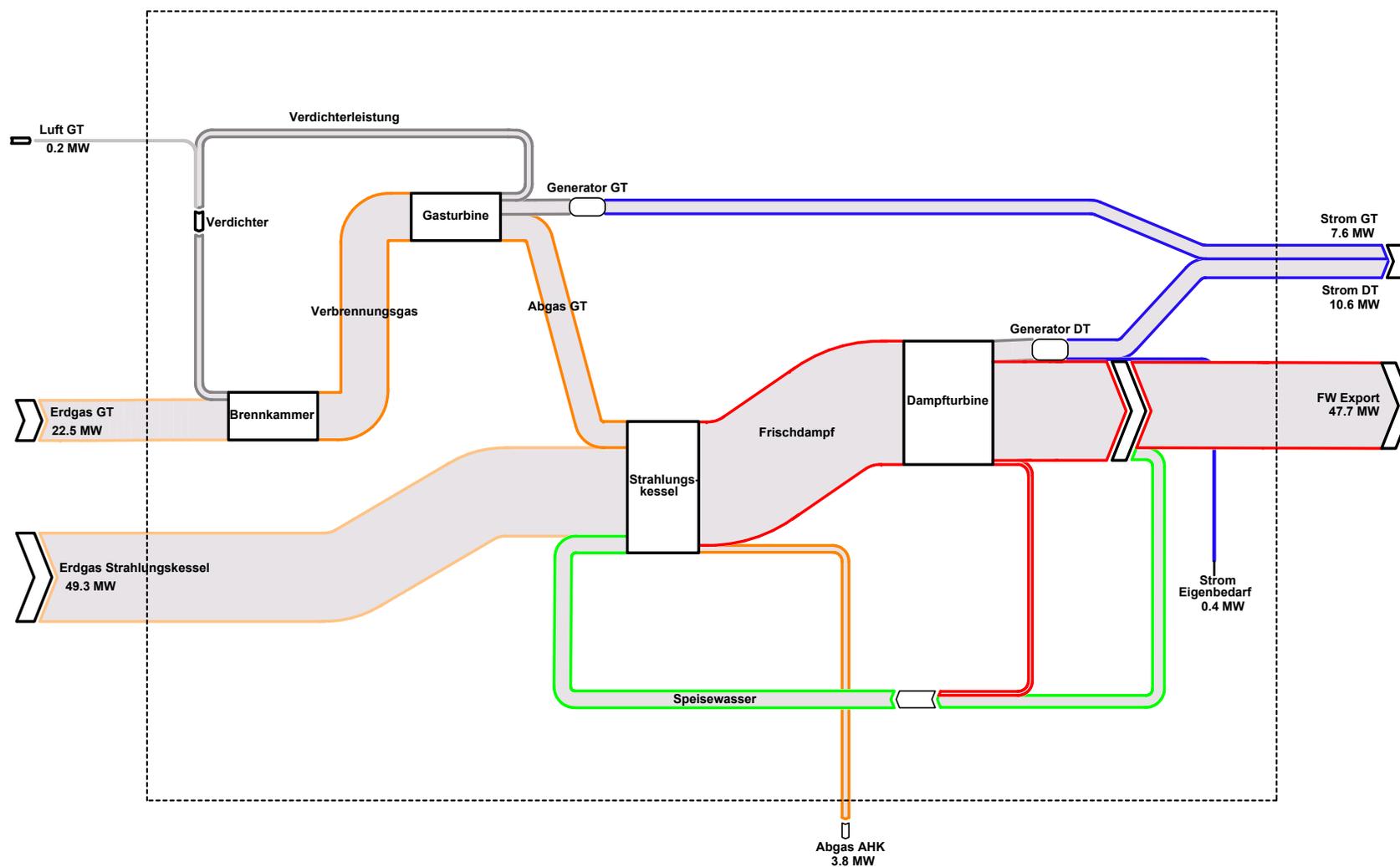


Abbildung 11: Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk

### Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk gekoppelt mit KVA

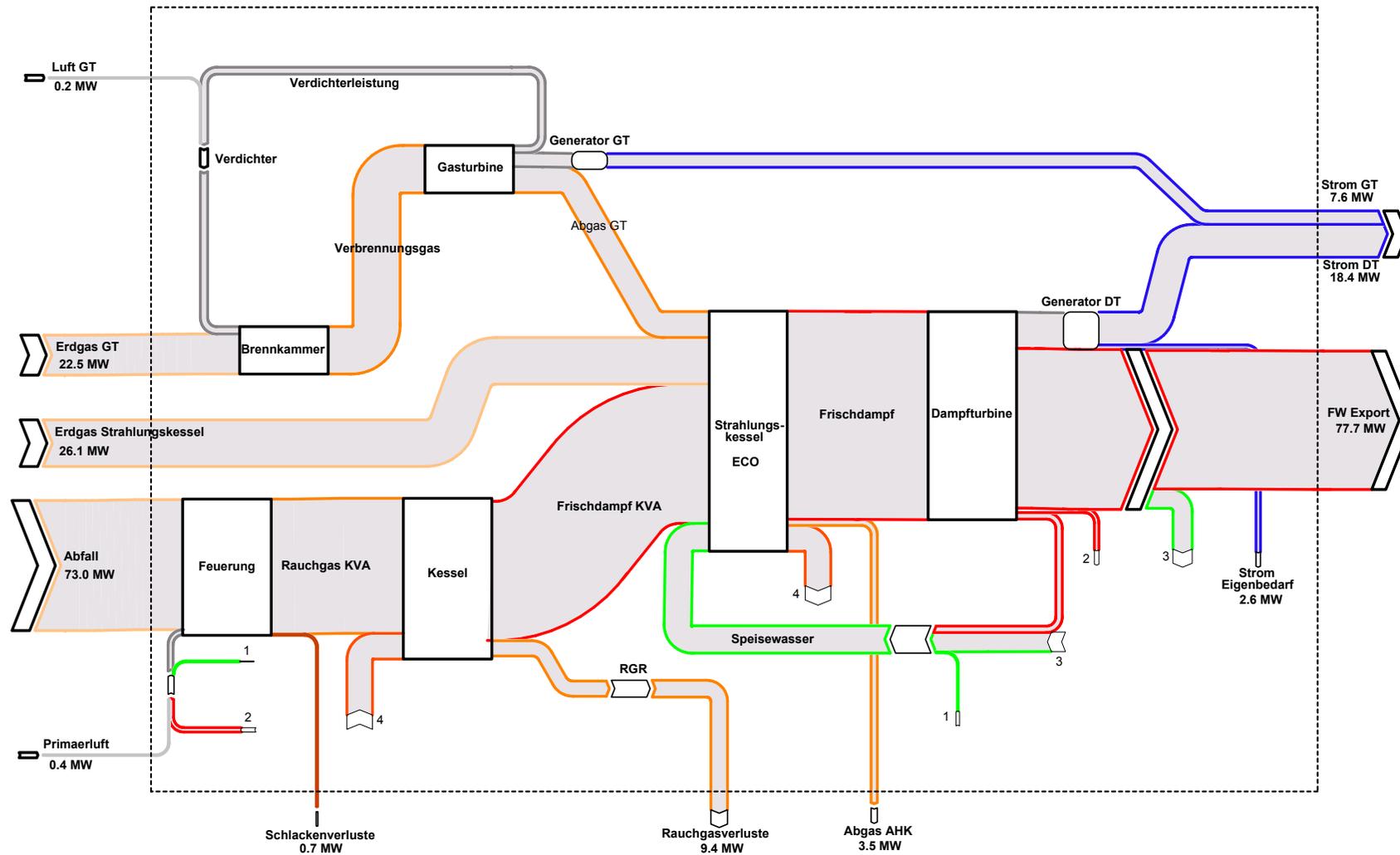


Abbildung 12: Sankey Diagramm GuD-Heizkraftwerk gekoppelt mit KVA