

Kriterien zur Zertifizierung
der
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Kurzfassung des Gutachtens

erstellt im Auftrag des

VIK
Verband der Industriellen
Energie- und Kraftwirtschaft e.V.
Essen

durch
Dr.-Ing. Arnold Tolle

Stand
02.08.2001

Dr. Tolle Energie & Umwelt Consulting

Geibelstr. 46 b
22303 Hamburg

Tel. 040 - 69 21 37 90
Fax: 040 - 69 21 37 99

eMail: arnold@tolle.de
Web: www.tolle.de

1 Zusammenfassung

Neben einer Gleichstellung von industrieller und kommunaler KWK und der Einbeziehung des KWK-Ausbaus sind die Qualitätskriterien zur Definition und Zertifizierung der KWK von entscheidender Bedeutung für eine wirtschaftliche Gesamtoptimierung. Aus industrieller Sicht betrifft dies

- die Minimierung der Gesamtkosten und damit eine Kostenentlastung gerade auch der industriellen Stromverbraucher
- die Sicherstellung höchster Effizienzkriterien für die Förderung von KWK

Nur so können die im Rahmen der CO₂-Selbstverpflichtung von der Industrie zugesagten Emissionsminderungen mit vertretbarem Aufwand erreicht werden.

Im aktuellen KWK-Gesetzentwurf basiert die Definition der KWK auf den Kriterien der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW), die ursprünglich für Dampfturbinenkraftwerke entwickelt wurden. Auf Effizienzkriterien wird jetzt völlig verzichtet.

Die Analyse zeigt, daß das im jetzigen Gesetzentwurf vorgeschlagene Zertifizierungskriterium die oben geforderte Lenkungswirkung hin zu ökonomisch und ökologisch effizienten KWK-Anlagen weitgehend vermissen läßt. Teilweise führt es sogar zu einer Bevorzugung von KWK-Anlagen, in denen der zusätzliche Brennstoff deutlich schlechter als in einem externen neuen Kraftwerk ohne KWK verstromt wird. Dies muß als Fehlallokation von Fördermitteln bezeichnet werden.

Es wird vorgeschlagen, die Effizienz des für die KWK-Stromerzeugung benötigten Brennstoffs als Zertifizierungskriterium zu wählen. Diese Effizienz wird durch den KWK-Wirkungsgrad beschrieben.

Der KWK-Wirkungsgrad soll daher als Zertifizierungs- und Effizienz-Kriterium ergänzt um das AGFW-Kriterium für die Auskopplung kleiner Wärmemengen aus großen Anlagen in den Gesetzentwurf integriert werden.

Der KWK-Wirkungsgrad als Kriterium zur Definition und zur Bewertung der Effizienz von KWK-Anlagen erweist sich als:

- **objektiv:** bewertet die Effizienz des für die KWK-Stromerzeugung benötigten Brennstoffs
- **technologieunabhängig:** wird allein aus Nutzwärme, erzeugtem Strom (mechanischer Arbeit) und Brennstoffeinsatz berechnet
- **zielgerichtet:** fördert ausschließlich effiziente KWK-Anlagen, die den Brennstoff besser als die besten fossilen Kraftwerke ohne KWK verstromen
- **kosteneffektiv:** führt bei gleichen Fördermitteln zu höheren Emissionsminderungen oder benötigt für gleiche Emissionsminderung weniger Fördermitteln
- **transparent:** erlaubt den direkten Vergleich auch zu Nicht-KWK-Kraftwerken
- **leicht handhabbar:** berechnet sich aus den selben Größen wie z.B. der Gesamtnutzungsgrad

2 Aufgabenstellung

2.1 Situation der KWK

Neben einer Gleichstellung von industrieller und kommunaler KWK und der Einbeziehung des KWK-Ausbaus sind die Qualitätskriterien zur Definition und Zertifizierung der KWK von entscheidender Bedeutung für eine wirtschaftliche Gesamtoptimierung. Aus industrieller Sicht betrifft dies

- die Minimierung der Gesamtkosten und damit eine Kostenentlastung gerade auch der industriellen Stromverbraucher
- die Sicherstellung höchster Effizienzkriterien für die Förderung von KWK
- eine optimale Gestaltungsmöglichkeit und Anreizwirkung für effektive KWK-Anlagen auch in der Industrie

2.1.1 Aktueller Gesetzentwurf

Im aktuellen Gesetzentwurf des BMWI sind keine Effizienzkriterien enthalten. Die Zertifizierung von KWK-Strom ist an die Regeln der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) angelehnt. Der Neubau und industrielle Anlagen sind weitestgehend ausgeschlossen.

Der VIK hat die vorausgegangene Verbändevereinbarung nur paraffiert unter der Bedingung, daß unter anderem höchste Energieeffizienz sichergestellt wird.

Diese Energieeffizienz muß gefordert werden, da nur mit ökologischer Zielgenauigkeit auch eine ökonomische Effizienz gewährleistet werden kann. Es darf keine Fehlallokation von Mitteln geben.

2.2 Ziel des Gutachtens

Im Rahmen dieses Gutachtens soll daher geprüft werden, ob die oben beschriebenen und begründeten Anforderungen an das neue KWK-Gesetz durch die im aktuellen Gesetzentwurf vorhandenen Kriterien zur Zertifizierung von KWK-Strom erfüllt werden.

Ggf. sind praxisnahe Lösungsvorschläge zu erarbeiten, die in den Beratungsprozeß zum neuen KWK-Gesetz eingebracht werden können.

2.3 Vorgehensweise

Zur Lösung dieser Aufgabe wird der Wärmebedarf eines mittelgroßen sowie eines kleineren Industriebetriebes festgelegt. Der mittlere Betrieb wird mit hohen und geringeren jährlichen Betriebsstunden und der kleinere mit einer mittleren Betriebsstundenzahl gefahren.

Zur Versorgung dieser drei Bedarfsfälle werden nun KWK-Anlagen konzipiert und berechnet. Dabei werden verschiedene große Gasturbinen eingesetzt. Die Gasturbinen arbeiten wiederum in unterschiedlichen Kraftwerksschaltungen.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden dann in Grafiken verdichtet und gegenübergestellt. Dabei zeigen sich z.T. große Unterschiede in

- Emissionen und resultierenden Emissionsminderungen
- der Effizienz des für die KWK-Stromerzeugung zusätzlich eingesetzten Brennstoffes
- betriebswirtschaftlichen Erlösen und Aufwendungen (einschließlich zu erwartender Boni auf Basis des Gesetzentwurfes)
- den daraus resultierenden Gewinnen oder Verlusten.

Auf dieser Basis läßt sich klar analysieren, daß das im jetzigen Gesetzentwurf vorgeschlagene Zertifizierungskriterium die oben geforderte Lenkungswirkung hin zu ökonomisch und ökologisch effizienten KWK-Anlagen weitgehend vermissen läßt. Teilweise führt es sogar zu einer Bevorzugung von KWK-Anlagen, in denen der zusätzliche Brennstoff deutlich schlechter als in einem externen neuen Kraftwerk ohne KWK verstromt wird. Dies muß als Fehlallokation von Fördermitteln bezeichnet werden.

Im Einzelnen zeigt sich, daß das AGFW-Kriterium auch bei Ergänzung durch den Gesamtnutzungsgrad für die Bewertung von modernen KWK-Kraftwerksschaltungen insbesondere mit Gas- und Dampfturbinen nicht geeignet ist. Es besteht die Tendenz, daß

- kleine Gasturbinen insbesondere nur mit Abhitzeessel zu gut und
- mittlere und größere Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke mit Kondensationsteil zu schlecht

beurteilt werden.

Es wird vorgeschlagen, als Maß für die Effizienz direkt die Umsetzung des für die KWK-Stromerzeugung eingesetzten, zusätzlichen Brennstoffes zu nutzen. Sie wird durch den KWK-Wirkungsgrad dargestellt. Der KWK-Wirkungsgrad läßt sich leicht handhaben und aus den ohnehin gegebenen externen Größen Nutzwärme, Strom und Brennstoff - ähnlich wie der Gesamtnutzungsgrad - berechnen.

Für die Bewertung von KWK-Anlagen, bei denen kleine Wärmemengen aus großen Kraftwerken ausgekoppelt werden, ist das AGFW-Kriterium geeignet und sollte zur Zertifizierung genutzt werden.

Das im Hauptteil des Gutachtens eingesetzte Referenzszenario wurde im Anhang noch um 2 weitere Betrachtungen ergänzt. Über den dort angegebenen Formelsatz lassen sich zudem auch eigene, selbst definierte Referenzfälle leicht berechnen.

3 Übersicht

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die Versorgung einer mittleren Industrieanlage mit 39.4 MW Prozeßdampf. Dabei werden verschiedene KWK-Schaltungen eingesetzt. Zunächst werden in einem Basisvergleich mit einer GT drei verschiedene Schaltungen (B1 AHK: Abhitzekeessel, B2 DT GD: Gegendruckdampfturbine, B3/B4 DT EK: Entnahme-/Kond.-Dampfturbine) realisiert. Die Entnahme-/Kond.-Schaltung wird noch einmal nach der Zertifizierung differenziert. (Bild 1 und Bild 2)

Danach wird der Vergleich noch einmal um eine kleinere und eine größere Gasturbine erweitert. Der Betrieb erfolgt im Grundlastbetrieb. (Bild 3 bis Bild 5) Alle Varianten werden dann noch einmal mit deutlich verringerter Stundenzahl im Schichtbetrieb auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. (Bild 6)

Zum Schluß wird noch eine kleine (2.4 MW) Industrieanlage mit vier verschiedenen Gasturbinen jeweils in AHK- und DT GD-Schaltung vorgestellt. (Bild 7 und Bild 8)

4 Mittlere Industrieanlage

Eindrucksvoll läßt sich mit den Varianten B1 bis B4 in Bild 1 zeigen, zu welchen unterschiedlichen Ergebnissen die technische Auslegung der KWK-Anlagen führen kann: obwohl in allen drei technischen Varianten B1, B2 und B3/B4 dieselbe Gasturbine mit demselben Brennstoffbedarf eingesetzt und derselbe Wärmebedarf gedeckt wird, führt die Entnahme-/Kondensationschaltung gegenüber der einfachsten Ausführung zu +34% höheren Emissionsminderungen.

Die Emissionsminderung in den externen Kraftwerken wird mit einer spezifischen CO₂-Emission von 1.00 kg/kWh berechnet, weil davon ausgegangen wird, daß zunächst existierende Mittellastkraftwerke zurück gefahren werden. Erläuterungen dazu und der Vergleich von zwei weiteren Szenarios finden sich im Anhang des Hauptgutachtens.

Zertifizierbarer KWK-Strom soll **niedrigere, spezifische Emissionen** aufweisen **als Strom** aus jedem anderen, mit fossilen Brennstoffen beheiztem Kraftwerk. Dann muß der KWK-Wirkungsgrad $\eta_{\text{KWK}} \geq 60\%$ erfüllt sein.

Obwohl B1 (Gasturbine mit Abhitzekeessel) einen Gesamtnutzungsgrad von $\eta_{\text{ges}} = 70.1\%$ erreicht, beträgt der KWK-Wirkungsgrad nur $\eta_{\text{KWK}} = 57.6\%$. Dies bedeutet, daß der für die Stromerzeugung in B1 benötigte Brennstoff mit derselben Effizienz wie in einem neuen Groß-GuD-Kraftwerk ohne KWK verstromt wird. B1 sollte daher keine Zertifikate/Boni erhalten. (Bild 2)

Mit 502'000 t/a ist das CO₂-Minderungspotential der großen Gasturbine in Entnahme-/Kond.-Schaltung mit ZÜ G5 sehr groß. (Bild 3) Es übersteigt die entsprechende Variante der Basisgasturbine B3/B4 um 70%. Das Reduktionspotential der kleineren Gasturbine K1 bzw. K2 beträgt gegenüber der großen G5 nur 32% bzw. 37%. K1/K2 stellt etwa die Größenordnung dar, bei der der Wärmebedarf noch durch die Zusatzfeuerung ausgeregelt werden kann. Die Anwendung der AGFW-Kriterien würde also hier zu einer Verringerung des CO₂-Minderungspotentials auf etwa ein Drittel führen.

Auffällig sind die sehr niedrigen KWK-Wirkungsgrade von G1 bzw. G2 (Bild 4). Mit $\eta_{\text{KWK}} = 44\%$ bzw. $\eta_{\text{KWK}} = 48\%$ wird der für die KWK zusätzlich eingesetzte Brennstoff deutlich schlechter verstromt als in einem neuen GuD-Kraftwerk ohne KWK, obwohl G1 und G2 das AGFW-Kriterium erfüllen.

Die großen Reduktionen von G3 bis G5 (große Gasturbine in Entn.-/Kond.-Schaltung) werden dagegen mit niedrigeren spezifischen Emissionen als in einem externen Groß-GuD erzielt: mit $\eta_{\text{KWK}} = 61\%/62\%$ wird das Effizienzkriterium KWK-Wirkungsgrad erfüllt. Es ist daher sichergestellt, daß der zusätzliche Brennstoff besser als in einem neuen, großen mit Gas gefeuerten GuD-Kraftwerk verstromt wird.

Wirtschaftlich zeigt sich, daß bei Anwendung der AGFW-Kriterien im Grundlastbetrieb die kleinste Gasturbine mit den geringsten Emissionsminderungen K1/K2 gewählt werden muß, da nur sie über die Zusatzfeuerung ausreichende Regelungsmöglichkeiten aufweist. (Bild 5) Bei Zertifizierung durch den KWK-Wirkungsgrad könnten dagegen die effizienten Lösungen mit hohem Reduktionspotential B4 oder G4/G5 realisiert werden. Sie sind zudem hervorragend regelbar.

Die große Gasturbine in den einfachen Schaltungen G1/G2 ist im Grundlastbetrieb nicht wirtschaftlich, erweist sich bei geringeren jährlichen Benutzungsstunden im Schichtbetrieb jedoch als attraktivste Lösung. (Bild 6) Die wirtschaftlichste Anlage bei Anwendung des AGFW-Kriteriums im Schichtbetrieb ist G2, die den zusätzlichen Brennstoff jedoch nur mit 48% verstromt.

Die Lösung mit den größten Reduktionen G3 fährt bei Anwendung der AGFW-Kriterien wirtschaftliche Verluste ein, da G1/G2 deutlich mehr Boni als die hocheffiziente Schaltung G3 erhalten. Eine ökologisch orientierte Anreizwirkung zeigt sich nur bei Zertifizierung durch den KWK-Wirkungsgrad.

5 Kleine Industrieanlage

Bei der Versorgung des kleinen Industriebetriebes erfüllt nur die kleinste Gasturbine mit Zusatzfeuerung S1 bzw. S2 mit

$$\eta_{\text{KWK}} = 63.0\% \text{ bzw. } 64.0\%$$

das Effizienzkriterium

$$\eta_{\text{KWK}} \geq 60 \%$$

Alle anderen Varianten weisen deutlich niedrigere KWK-Wirkungsgrade auf. Bei der 2MW-Gasturbine S7 bzw. S8 liegen sie sogar nur bei

$$\eta_{\text{KWK}} = 36.5\% \text{ bzw. } 39.7\%$$

Nur in S1/S2 wird daher der für die KWK-Stromerzeugung benötigte Brennstoff günstiger als in einem neuen GuD-Kraftwerk verstromt. In den anderen Schaltungen wird der Brennstoff jedoch deutlich schlechter umgesetzt.

Interessant ist die Analyse der Varianten S3 bzw. S4: obwohl sie einen Gesamtnutzungsgrad von

$$\eta_{\text{ges}} = 72.2\% \text{ bzw. } 74.9\%$$

aufweisen, beträgt ihr KWK Wirkungsgrad nur

$$\eta_{\text{KWK}} = 50.0\% \text{ bzw. } 55.9\%$$

Man sieht, daß der Gesamtnutzungsgrad als Effizienz-Kriterium nicht geeignet ist.

Trotz des hohen Strompreises von 90.00 €/MWh läßt sich für die einzigen Schaltungen mit ausreichendem KWK-Wirkungsgrad S1 und S2 keine Wirtschaftlichkeit erzielen. Das beste Gesamtergebnis wird mit den größeren Gasturbinen mit gleichzeitig viel zu niedrigen KWK-Wirkungsgraden erreicht. Es zeigt sich auch hier, daß das Effizienzkriterium KWK-Wirkungsgrad zur Erzielung einer Lenkungswirkung unbedingt erforderlich ist.

5.1 Gleitender Wechsel Bonusklassen

Variante S7 liegt an der oberen Grenze des Leistungsbereichs der Bonusklasse kleine KWK-Anlagen und wird daher noch mit durchschnittlich 22.60 €/MWh gefördert. Durch Zubau der Dampfturbinen fällt die Anlage in die darüber liegende Klasse mit einer Förderung von durchschnittlich 12.30 €/MWh. Dies ist deutlich am sprunghaften Rückgang der Zertifikate von S8 zu erkennen.

S8 ist damit trotz höherer Effizienz und größerer Emissionsminderung gegenüber S7 nicht mehr wirtschaftlich. Durch die Sprungfunktionen in den Förderbedingungen wird hier der Bau einer effizienteren Anlage vermieden.

Um derartige negative Effekte zu vermeiden, sollte der Übergang von einer Leistungs-klasse in die andere nicht sprunghaft erfolgen sondern über einen größeren Bereich z. B. von 2 MW auf 5 MW kontinuierlich gleiten.

Im vorliegenden Fall ergibt sich damit eine Reduktion des Bonus auf 21.92 €/MWh. Die ökologische günstigere Variante S9 kann gegenüber S7 realisiert werden. Dessen ungeachtet bleibt der Einwand von viel zu niedrigen KWK-Wirkungsgraden von S7/S9 bestehen.

6 Vorschläge

Der KWK-Wirkungsgrad soll daher als Zertifizierungs- und Effizienz-Kriterium ergänzt um das AGFW-Kriterium für die Auskopplung kleiner Wärmemengen aus großen Anlagen in den Gesetzentwurf integriert werden.

Ergänzend und alternativ zu einer Bewertung der KWK-Effizienz über die jährliche oder monatliche Arbeit von Strom, Nutzwärme und Brennstoff soll auch eine Abrechnung im Stundentakt, kompatibel zum börsenorientierten Stromhandel, möglich sein. So können flexible KWK-Anlagen temporär aus dem KWK-zertifizierten Betrieb herausgenommen werden und ohne Boni aber mit höheren Strompreisen an der Spitzenstromerzeugung teilhaben. Die dabei erzielten, niedrigen spezifischen Emissionen sollen im Monitoring Industrie oder Kommunen kreditiert werden.

Die Einführung von Preisgleitklauseln sollte überprüft werden.

7 Benefits

Industrie und Volkswirtschaft werden durch derartige Modifizierungen der Rahmenbedingungen und den Ausbau der KWK mehrfach gewinnen:

- geringere Belastungen der Stromverbraucher, da mit geringerem Aufwand höhere Emissionsminderungen erzielt werden
- Verringerung der großen Risiken durch ein Oligopol weniger großer Strom- und Brennstoff-Versorgungs-Unternehmen
- zusätzliche Einnahmen für Industriebetriebe mit Wärmebedarf
- Umsatzsteigerungen und Know-how-Gewinn für Anlagenhersteller, Planer und Contractoren
- Zunahme qualifizierter Arbeitsplätze

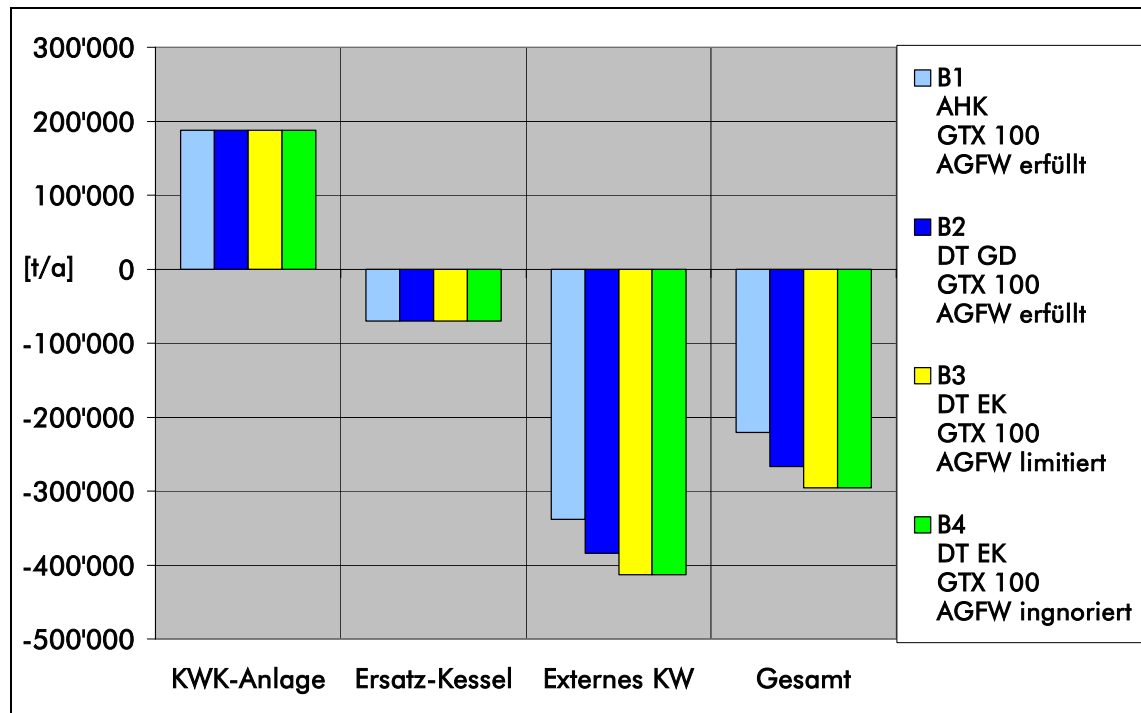


Bild 1 CO₂-Emissionen von vier verschiedenen KWK-Schaltungen. Jedesmal gleiche Gasturbine, gleicher Brennstoffbedarf, gleicher Nutz-Wärmebedarf: 39.4 MW, Benutzungsstunden: 8'100 h/a
Höchste Emissionsminderung in der Entnahme-/Kond.-Schaltung B3/B4

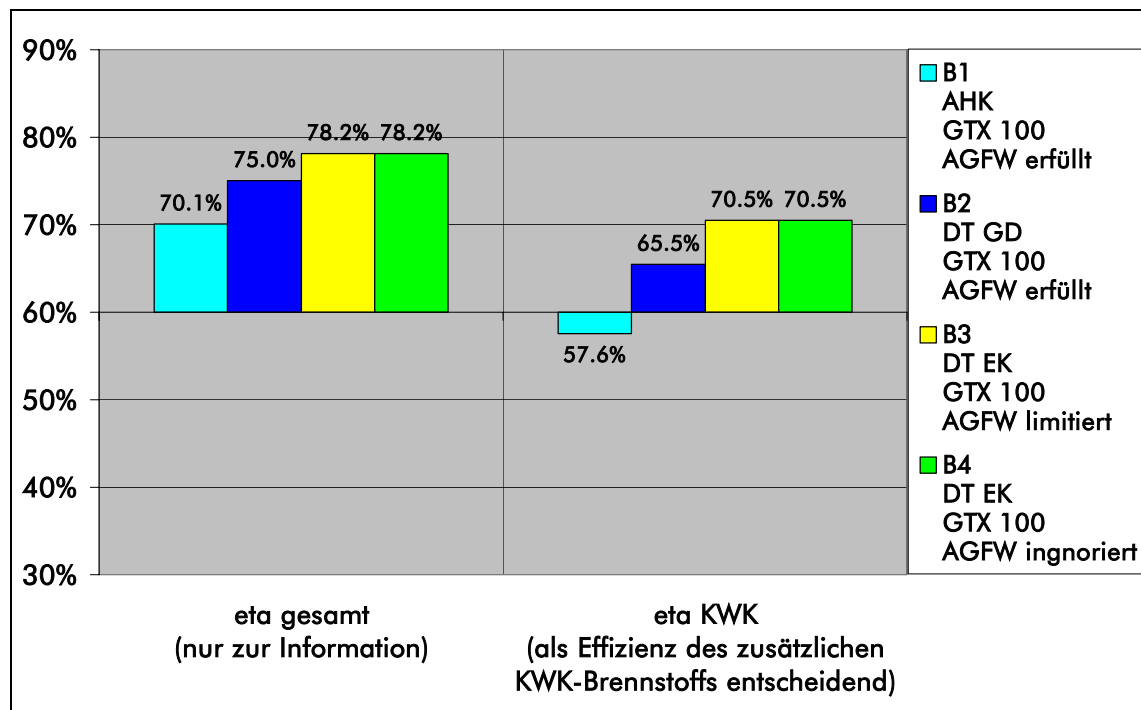


Bild 2 Gesamt-Wirkungsgrad und KWK-Wirkungsgrad
Die Entnahme-/Kond.-Schaltung B3/B4 hat die höchsten Wirkungsgrade. Obwohl B1 einen Gesamtnutzungsgrad von 70.1% erreicht und das AGFW-Kriterium erfüllt, wird der Strom mit einem Wirkungsgrad von 57.6% dennoch nicht besser als in einem neuen Groß-GuD-Kraftwerk erzeugt.

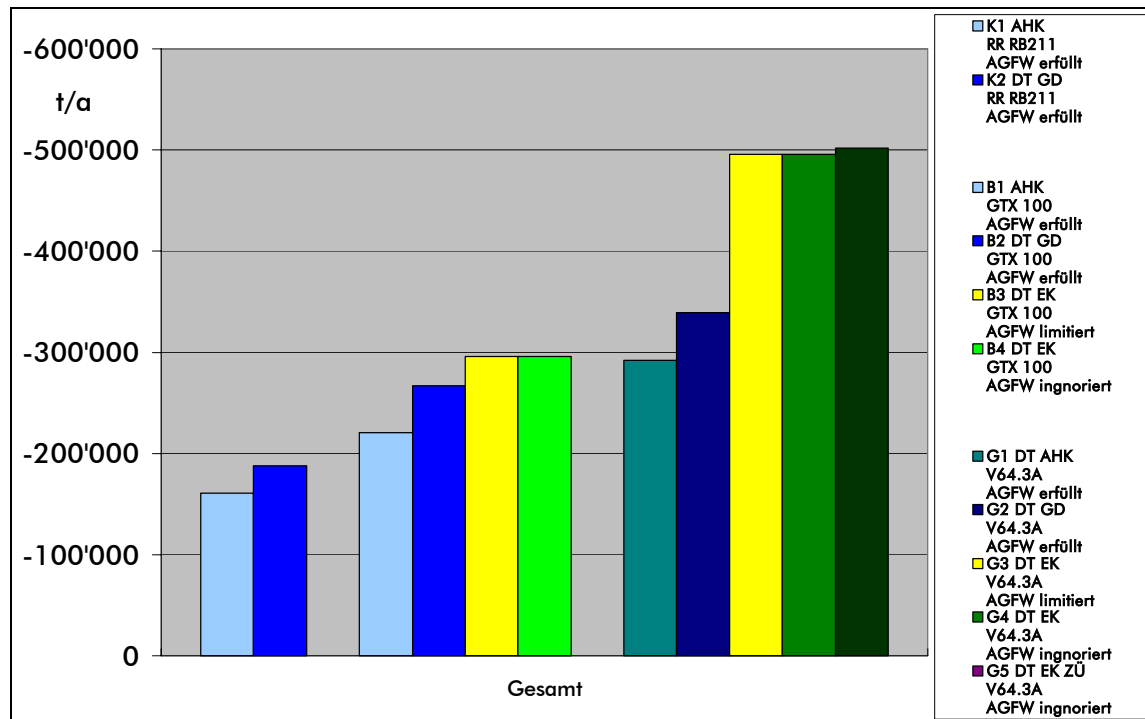


Bild 3 Minderung CO₂-Emissionen durch KWK-Anlagen, 3 verschiedenen Gasturbinen
Zertifizierung nach dem KWK-Wirkungsgrad führt im Grundlastbetrieb bei knapp 40 MW Nutz-Wärmebedarf zur Reduktion von jährlich einer halben Million Tonnen CO₂.
Mit AGFW-Kriteriums wird dagegen aufgrund eingeschränkter Regelungsmöglichkeiten nur etwa ein Drittel dieser Menge eingespart.

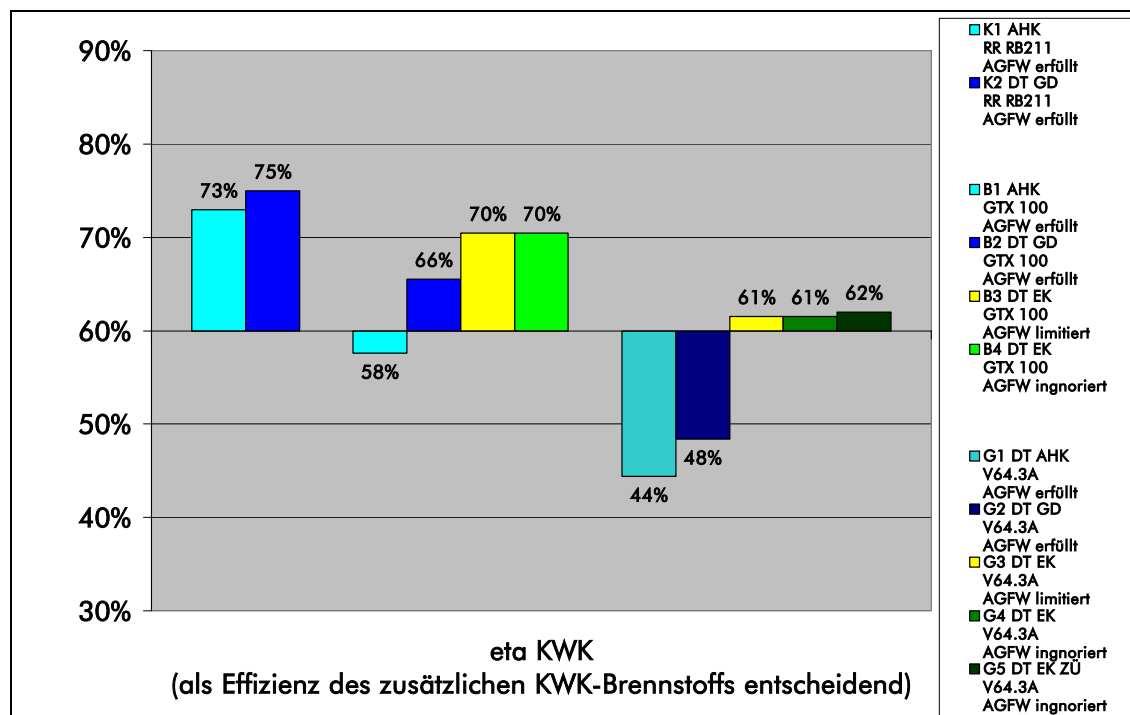


Bild 4 KWK-Wirkungsgrad der Gasturbinenschaltungen
G1 und G2 erfüllen das AGFW-Kriterium, dennoch wird der Brennstoff deutlich schlechter als in einem GuD-Kraftwerk ohne KWK verstromt.
Die großen Einsparungen von G3 bis G5 werden dagegen mit niedrigeren spezifischen Emissionen als in einem externen Groß-GuD erzielt.

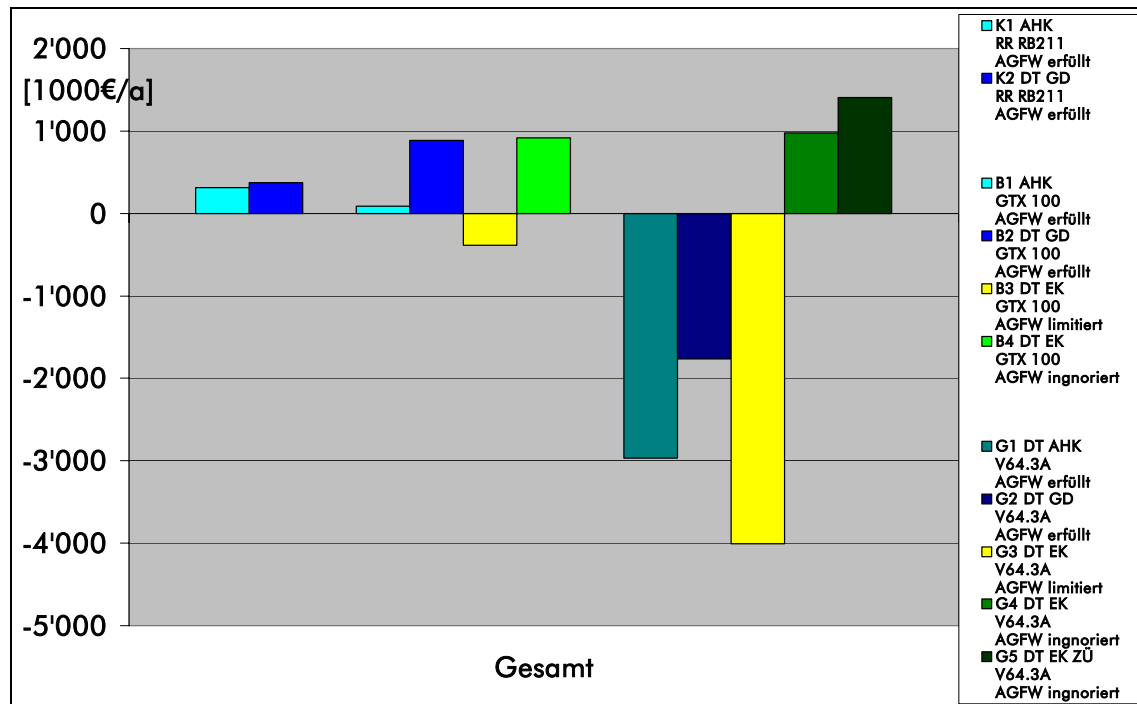


Bild 5 Wirtschaftliches Gesamtergebnis der 3 Gasturbinen im Grundlastbetrieb
8'100 h/a, Strom/Boni/ Brennstoff(Hu): 33.00/12.30/14.50 €/MWh
Die effizienten B4 und G4/G5 sind nur über den KWK-Wirkungsgrad zu zertifizieren.

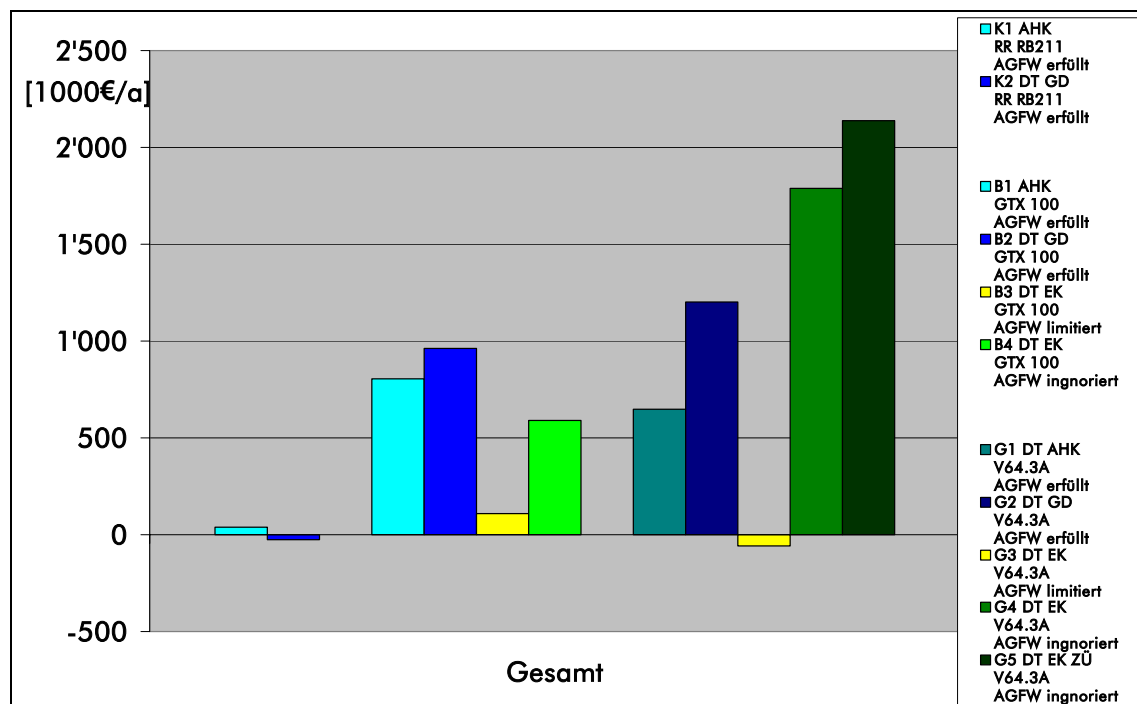


Bild 6 Wirtschaftliches Gesamtergebnis der 3 Gasturbinen im Schichtbetriebs: 3'000 h/a
Strom/Boni/ Brennstoff(Hu):61.00/12.30/14.50 €/MWh
Der KWK-Wirkungsgrad befördert die Anlagen mit den höchsten Reduktionen und erweist damit hohe ökologische Lenkungswirkung.
Bei AGFW-Zertifizierung liefert dagegen G3 die höchsten Gewinne, obwohl sie den zusätzlichen Brennstoff mit vergleichsweise nur niedrigen 48% verstromt.

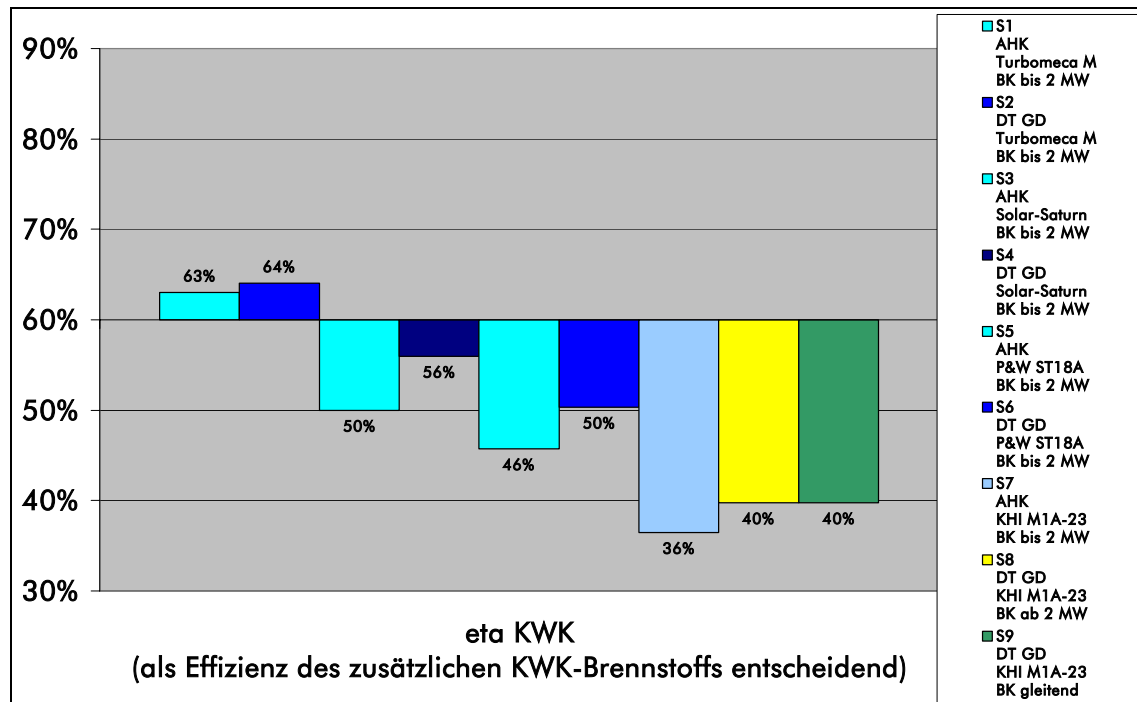
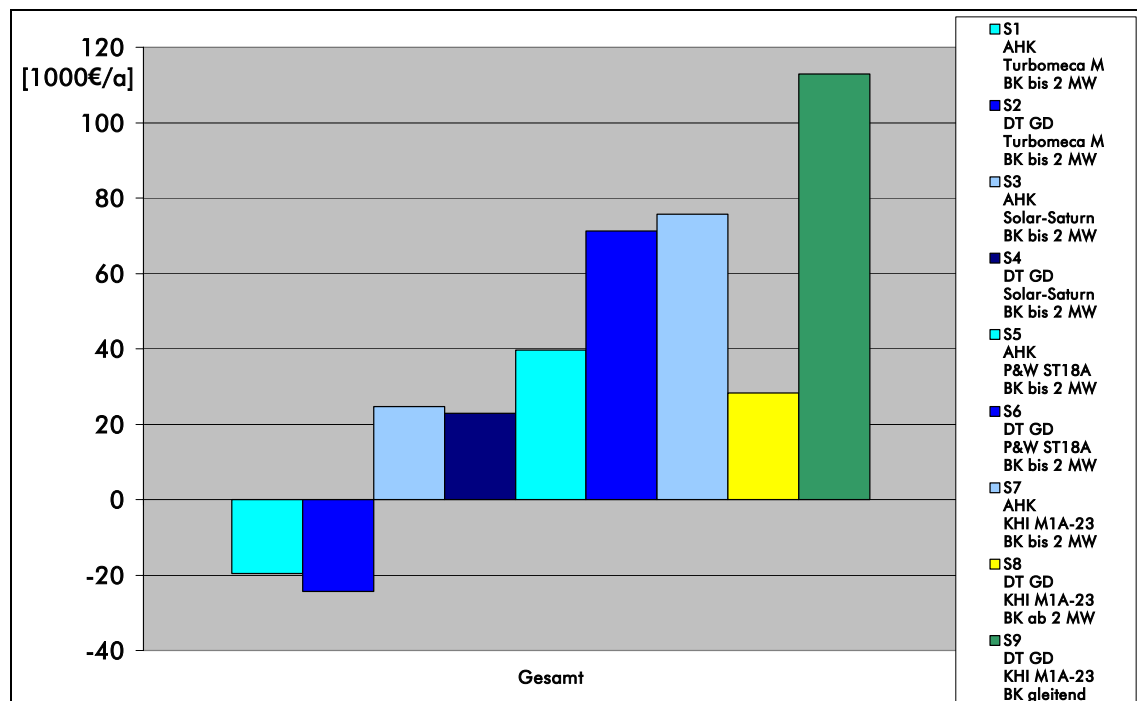


Bild 7 KWK-Wirkungsgrad kleine Anlage mit 4 GT jeweils AHK u. DT GD, Wärmebed. 2.4 MW

**Alle Schaltungen werden nach dem aktuellen Gesetzentwurf gefördert.
Nur die kleinste Gasturbine (S1 und S2) verstromt den Brennstoff besser als ein neues
GuD-Kraftwerk, alle anderen z.T. erheblich schlechter.**



**Bild 8 Wirtschaftliches Gesamtergebnis der 4 Gasturbinen
4'000 h/a, Strom/Boni/ Brennstoff(Hu): 90.00/22.60/14.50 €/MWh
Die effiziente Gasturbine S1/S2 erreicht keine Wirtschaftlichkeit.
Große Gasturbinen mit niedriger Effizienz erzielen die höchste Wirtschaftlichkeit.
Eine Gleitklausel zwischen Bonusklassen ist erforderlich (S7/S8/S9).**