

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

Gutachten

erstellt im Auftrag des

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

durch

Dr.-Ing. Arnold Tolle

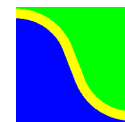
Stand

02.08.2001

INHALT

1	ZUSAMMENFASSUNG	6
2	AUFGABENSTELLUNG	7
2.1	Situation der KWK	7
2.1.1	Aktueller Gesetzentwurf	7
2.2	Ziel des Gutachtens.....	7
2.3	Vorgehensweise	8
3	SYSTEMVERGLEICH: MITTLERE INDUSTRIELLE KWK-ANLAGE	9
3.1	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	9
3.1.1	Wärmebedarf	9
3.1.2	Energiepreise	9
3.1.2.1	Hohe Strompreise erforderlich.....	10

3.2	Schaltungen: Basisvarianten B1-B4 (Grundlastbetrieb)	10
3.2.1	Untersuchte Schaltungen	10
3.2.1.1	B1 Gasturbine mit Abhitzeessel (AHK)	10
3.2.1.2	B2 Gasturbine, Abhitzeessel und Dampfturbine Gegendruck (DT GD)	10
3.2.1.3	B3/B4 Gasturbine, AHK und DT in Entnahme-/Kond.-Schaltung (DT EK)	10
3.2.1.4	B3 GT mit AHK und DT EK nach AGFW zertifiziert	10
3.2.1.5	B4 GT mit AHK und DT EK nach KWK-Wirkungsgrad zertifiziert	10
3.2.2	Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf	11
3.2.3	Jährliche Arbeit	11
3.2.4	CO ₂ -Emissionen und -Reduktionen	12
3.2.4.1	Schaltung mit Kondensator ist am effizientesten	13
3.2.5	Effizienzkriterien	13
3.2.5.1	KWK-Wirkungsgrad	13
3.2.5.1.1	Effizienz des zusätzlichen Brennstoffs für die KWK	14
3.2.5.2	AGFW-Kriterium	15
3.2.5.3	Gesamtnutzungsgrad	15
3.2.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse	16
3.2.6.1	Effizienteste Anlage erhält wenigste Zertifikate	17
3.2.7	Ökologische Optimierung über KWK-Wirkungsgrad	17
3.2.7.1	AGFW-Kriterien verhindern effizienteste Anlage	17
3.2.7.2	Kapital erforderlich	18
3.2.8	Regelungsmöglichkeit mit Teilkondensator gegeben	18
3.3	Weitere Schaltungen (Grundlastbetrieb)	19
3.3.1	Kleinere Gasturbine	19
3.3.1.1	K1 Kleinere Gasturbine mit Abhitzeessel (AHK)	19
3.3.1.2	K2 Kleinere Gasturbine mit AHK und DT in Gegendruck-Schaltung	19
3.3.2	Größere Gasturbine	19
3.3.2.1	G1 Gasturbine mit AHK	19
3.3.2.2	G2 Gasturbine mit AHK und DT in Gegendruckschaltung	19
3.3.2.3	G3/G4 GT mit AHK und DT in Entnahme-/Kond.-Schaltung	19
3.3.2.4	G5 GT und DT in Entn./Kond.-Schaltung mit Zwischenüberhitzung (ZÜ)	20
3.3.3	Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf	20
3.3.4	CO ₂ -Emissionen und -Reduktionen	21
3.3.5	Ökologische Güte	23
3.3.5.1	KWK-Wirkungsgrad sichert ökologische Qualität	24
3.3.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse	25
3.3.6.1	Große Gasturbinen: Mehr Boni für mehr Emissionen?	27
3.3.6.2	Effizienteste Anlagen erfordern KWK-Wirkungsgrad	27
3.3.6.3	Zwischenüberhitzung: aktuelle Grenze des technisch Machbaren	27
3.3.6.4	Kleinere Gasturbinen: Kein Anreiz für effizientere Schaltung	27



3.4	Szenario Schichtbetrieb.....	28
3.4.1	Wirtschaftliche Rahmendaten	28
3.4.2	Emissionsminderung und ökologische Qualität	28
3.4.3	Wirtschaftliches Ergebnis.....	28
3.4.3.1	Deutlich höhere Strompreise erforderlich.....	28
3.4.3.2	Kleinere Gasturbine: ineffizientere Schaltung wirtschaftlicher	29
3.4.3.3	Mittlere Gasturbine: ineffizientere Schaltungen wirtschaftlicher	29
3.4.3.4	Große Gasturbine:	30
3.4.3.4.1	KWK-Wirkungsgrad unterstützt günstigste Lösung G4/G5	30
3.4.3.5	AGFW-Kriterium verhindert ökologisch effizientere Lösungen	30
3.4.3.6	Zertifizierung durch KWK-Wirkungsgrad befördert effiziente Reduktion	30
4	SYSTEMVERGLEICH: KLEINE INDUSTRIELLE KWK-ANLAGE	32
4.1	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	32
4.1.1	Wärmebedarf	32
4.1.2	Energiepreise	32
4.2	Systemvergleich.....	33
4.2.1	Beschreibung der Schaltungen	33
4.2.1.1	S1 Kleinere GT mit Abhitzeessel (AHK) und Zusatzfeuerung (ZF)	33
4.2.1.2	S2 Kleinere GT mit AHK und DT in Gegendruck-Schaltung und ZF	33
4.2.1.3	S3 Gasturbine mit AHK.....	33
4.2.1.4	S4 GT mit AHK und DT in GD-Schaltung.....	33
4.2.1.5	S5 Größere GT mit AHK.....	33
4.2.1.6	S6 Größere GT mit AHK und DT in GD-Schaltung.....	33
4.2.1.7	S7 GT -2 MW- mit AHK	33
4.2.1.8	S8 GT -2 MW- mit AHK und GD-DT als große Anlage zertifiziert	33
4.2.1.9	S9 GT -2 MW- mit AHK und GD-DT mit Gleitformel zertifiziert	34
4.2.2	Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf.....	34
4.2.3	CO ₂ -Emissionen und -Reduktionen.....	35
4.2.4	Ökologische Qualität	36
4.2.4.1	KWK-Wirkungsgrad.....	37
4.2.4.2	Gesamtnutzungsgrad als Effizienz-Kriterium nicht geeignet	37
4.2.5	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	38
4.2.5.1	Wirtschaftlichkeit für effiziente Schaltungen zu niedrig	39
4.2.5.2	Gleitender Übergang zwischen Bonusklassen erforderlich	40

5	VORSCHLÄGE FÜR WEITERES VORGEHEN	41
5.1	Gesetzesentwurf.....	42
5.2	Stündliche Abrechnungsintervalle.....	43
5.3	Entwicklung einer Preisgleitklausel	43
5.4	Benefits	43
6	ANHANG	44
6.1	KWK-Wirkungsgrad	44
6.1.1	Definition des KWK-Wirkungsgrades	44
6.1.2	Definition KWK-Strom.....	44
6.1.3	Berechnung des KWK-Wirkungsgrades aus gegebenen Größen.....	44
6.1.4	Berechnung aus dimensionslosen Kenngrößen.....	45
6.2	Spezifische und absolute CO₂-Emissionen	45
6.2.1	Minderung CO ₂ -Emissionen in externen Kraftwerken.....	46
6.2.1.1	Referenz-Szenario: hocheffizientes Steinkohlekraftwerk.....	47
6.2.1.2	Referenz-Szenario: GuD-Kraftwerk auf Erdgasbasis	49
6.3	Bestimmung der brennstoffbedingten Stromgestehungskosten	51
6.4	Zertifizierung nach AGFW.....	52
6.4.1	Kontrollrechnung.....	52
6.4.2	Besonderheit GuD-Kraftwerk.....	53
6.5	Thermodynamische Effizienz	53
6.5.1	Kondensator Abwärme auf Umgebungsniveau	53
6.5.2	Thermodynamische Verluste auch ohne Wärmeverlust.....	53
6.6	KWK-Potentiale	54
6.7	Gleichwertigkeit von elektrischer und mechanischer Energie.....	54
6.7.1	Juristische Präzedenzfälle	54

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 verschieden 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 Systemvergleich: mittlere industrielle KWK-Anlage

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die Versorgung einer mittleren Industrieanlage mit Prozeßdampf. Dabei werden verschiedene KWK-Anlagen eingesetzt.

- Zunächst werden in einem Basisvergleich mit einer GT drei verschiedene Schaltungen realisiert. Die Entnahme-/Kond.-Schaltung wird noch einmal nach der Zertifizierung differenziert. Der Betrieb erfolgt im Grundlastbetrieb.
- Danach wird der Vergleich noch einmal um eine kleinere und eine größere Gasturbine erweitert.
- Alle Varianten werden dann noch einmal im mit deutlich verringerter Stundenzahl im Schichtbetrieb untersucht.

3.1 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

3.1.1 Wärmebedarf

Den Wärmebedarf zeigt Tabelle 3.1. Es wird angenommen, daß ein Dampf-Verteilernetz mit den Parametern entsprechend Tabelle 3.1 zur Verfügung steht. Das Kondensat wird zu 100% mit einer Temperatur von 90 °C zurückgeführt.

Tabelle 3.1 Dampfparameter

Dampf Druck	14.0 bar
Dampf Temperatur	220 °C
Dampf Menge	57.30 t/h
Nutz-Wärme	39.4 MW

3.1.2 Energiepreise

Das Energiepreinsniveau und die jährlichen Benutzungsstunden für die Betrachtungen zum Grundlastbetrieb sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Als Bonuspreis ist der mittlere Preis des im aktuellen Gesetzesentwurf vorgestellten Preismodells bei 10 Jahren Laufzeit angenommen. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist die Summe von Strompreis und Bonus.

Tabelle 3.2 Energiepreise und Benutzungsstunden (Grundlast) für Kap. 3.2 und 3.3

Preis Strom	33.00 €/MWh
Preis Bonus	12.30 €/MWh
Preis Brennstoff	14.50 €/MWh
Kapitaldienst	15.0%
Betriebsstunden	8'100 h/a

3.1.2.1 Hohe Strompreise erforderlich

Tabelle 3.2 zeigt bereits, daß ein recht hoher Strompreis erzielt werden muß, um selbst unter den für aktuelle Verhältnisse günstigen Voraussetzungen eine Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

3.2 Schaltungen: Basisvarianten B1-B4 (Grundlastbetrieb)

Zunächst werden in einem ersten Basis Vergleich die nachfolgend beschriebenen Schaltungen verglichen.

In allen vier Varianten wird dieselbe Gasturbine eingesetzt. Die Varianten B3 und B4 sind technisch identisch, sie unterscheiden sich nur hinsichtlich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen durch die unterschiedliche Zertifizierung und die damit verbundene, unterschiedliche Zusatzvergütung des KWK-Stroms.

3.2.1 Untersuchte Schaltungen

3.2.1.1 B1 Gasturbine mit Abhitzeessel (AHK)

Gasturbine und Abhitzeessel werden so gewählt und ausgelegt, daß der in 3.1.1 definierte Wärmebedarf gedeckt wird. Das AGFW-Kriterium wird erfüllt.

3.2.1.2 B2 Gasturbine, Abhitzeessel und Dampfturbine Gegendruck (DT GD)

Es wird wieder dieselbe Gasturbine eingesetzt. Der Kessel wird als Hochdruckkessel mit zweiter Druckstufe ausgeführt. Der Hochdruckdampf wird über eine Dampfturbine in Gegendrucksschaltung entspannt. Bei gleichem Brennstoffbedarf und gleicher Nutzwärme-Abgabe steigt die Stromausbeute. Das AGFW-Kriterium wird erfüllt.

3.2.1.3 B3/B4 Gasturbine, AHK und DT in Entnahme-/Kond.-Schaltung (DT EK)

Bei nochmals gleicher Gasturbine wird hier erneut die Effizienz des Abhitzeessels gesteigert: so kann mehr Dampf erzeugt werden, als für die Versorgung der industriellen Prozeßanlage notwendig ist.

Die Dampfturbine wird im Hochdruckteil vergrößert und um einen Kondensationsteil ergänzt, der diesen zusätzlich gewonnenen Prozeßdampf verstromt.

Bei wieder gleicher Gasturbine, ohne Zusatzfeuerung, gleichem Brennstoffeinsatz und gleicher Nutzwärmeabgabe steigt so noch einmal die Stromausbeute. Die **Effizienz nimmt** also noch einmal deutlich **zu!**

3.2.1.4 B3 GT mit AHK und DT EK nach AGFW zertifiziert

Die Schaltung ist technisch mit B4 identisch. Diese Schaltung wird entsprechend AGFW-Kriterium zertifiziert.

3.2.1.5 B4 GT mit AHK und DT EK nach KWK-Wirkungsgrad zertifiziert

Die Schaltung ist technisch mit B3 identisch. Im Unterschied zu B3 wird jedoch der gesamte Strom zertifiziert.

Das Kriterium der KWK-Wirkungsgrades $\eta_{\text{KWK}} \geq 60\%$ ist erfüllt. Der Strom wird daher günstiger als in jedem anderen, mit fossilen Brennstoffen gefeuerten Kraftwerk erzeugt.

3.2.2 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf

Die elektrische Leistung und der Brennstoffbedarf (Hu) der verschiedenen Basis-Varianten sind Tabelle 3.3 zu entnehmen.

Tabelle 3.3 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf der Basisvarianten

Variante	B1	B2	B3	B4
Typ	AHK	DT GD	DT EK	DT EK
Gasturbine	GTX 100	GTX 100	GTX 100	GTX 100
Zertifizierung	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW limitiert	AGFW ignoriert
Elektrische Netto-Leistung	41.7 MW	47.4 MW	51.0 MW	51.0 MW
Brennstoff (Hu) gesamt	115.8 MW	115.7 MW	115.7 MW	115.7 MW

Die Zertifizierung nach AGFW erfolgt über die Methode der Dampfmassenstromverhältnisse zwischen Kondensator und Heizkondensator. Das Verfahren ist in 3.2.4 beschrieben.

3.2.3 Jährliche Arbeit

Mit den o.g. Daten ergeben sich folgende Werte für die jährliche Arbeit:

Tabelle 3.4 Jährliche Arbeit der Basisvarianten

Variante	B1	B2	B3	B4
Typ	AHK	DT GD	DT EK	DT EK
Gasturbine	GTX 100	GTX 100	GTX 100	GTX 100
Zertifizierung	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW limitiert	AGFW ignoriert
Jahresarbeit Wärme	319 GWh/a	319 GWh/a	319 GWh/a	319 GWh/a
Jahresarbeit Elektrisch netto	338 GWh/a	384 GWh/a	413 GWh/a	413 GWh/a
Jahresarbeit Brennstoff (Hu) gesamt	938 GWh/a	938 GWh/a	938 GWh/a	938 GWh/a

3.2.4 CO₂-Emissionen und -Reduktionen

Bild 3.1 verdeutlicht die CO₂-Emissionen sowohl am Standort selbst auch die dadurch erzielbaren Reduktionen in externen Kraftwerken.

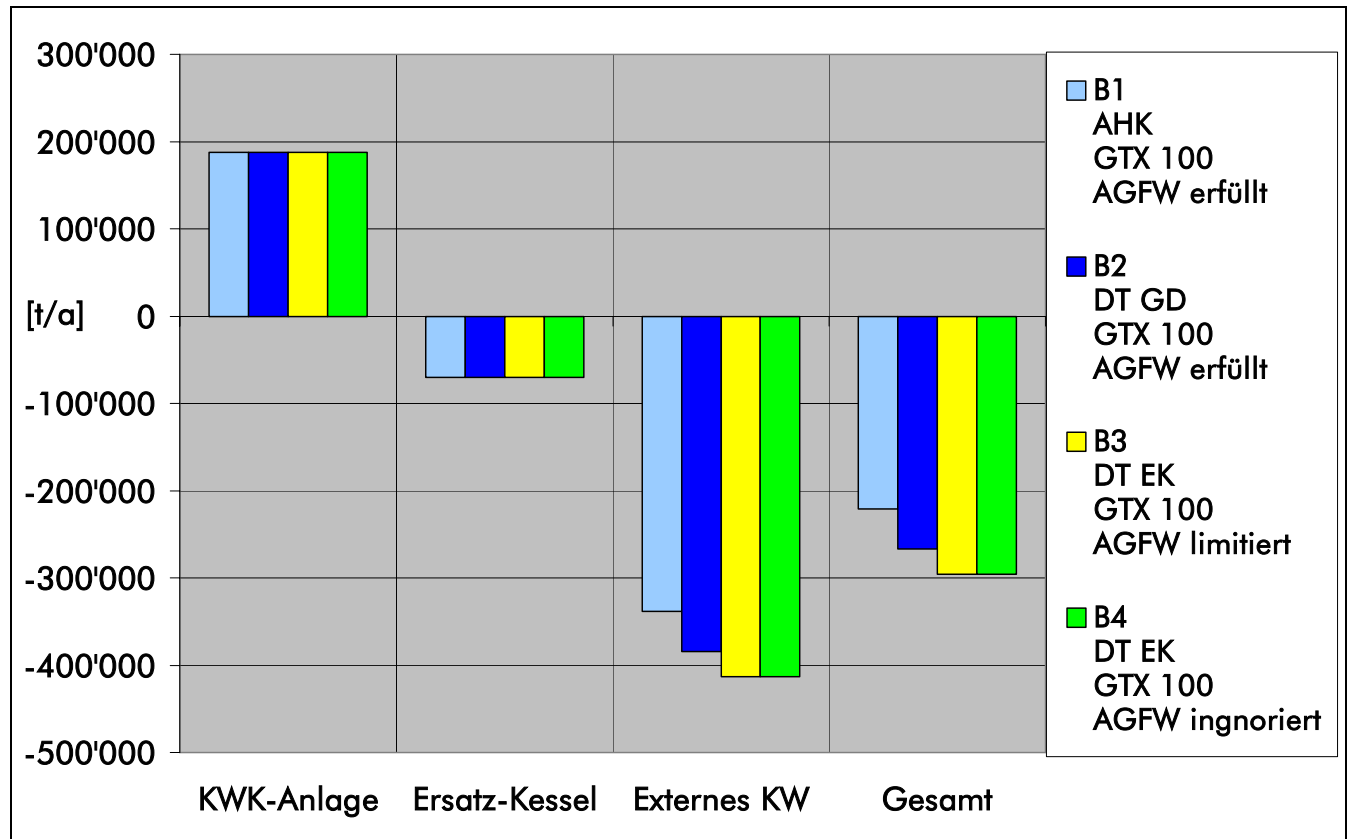


Bild 3.1 CO₂-Emissionen von vier verschiedenen KWK-Modellen.
Es wird jedesmal dieselbe Gasturbine (ABB GTX 100) eingesetzt,
gleicher Nutz-Wärmebedarf: 39.4 MW, Benutzungsstunden: 8'100 h/a

Alle Varianten B1 bis B4 haben dieselbe Gasturbine und werden ohne Zusatzfeuerung betrieben. Daher emittieren alle vier Basisvarianten am Standort selbst auch dieselbe jährliche CO₂-Menge, nämlich 188'000 t/a. Gegenüber diesen Emissionen können die Emissionen einer alternativen Wärmeversorgung und die Einsparungen in externen Kraftwerken gegengerechnet werden:

Ohne KWK-Anlage müßte die Wärme des Industriebetriebes ersatzweise in einem Kessel bereitgestellt werden. Bei einem Kesselnutzungsgrad von 91 % (entsprechend neuer BImSchV für Großkessel) würden dabei jeweils 70'000 t/a CO₂ emittiert. Diese Menge fällt bei Inbetriebnahme der KWK-Anlage weg und wird daher gutgeschrieben.

Der in der KWK-Anlage erzeugte Strom führt dazu, daß dieser Strom nicht mehr in anderen, externen Kraftwerken erzeugt wird (s.a. Kap.). Entsprechend der jeweiligen KWK-Nettostromerzeugung (Tabelle 3.3) werden der daher in externen Kraftwerken große Mengen an CO₂ eingespart: Von 338'000 t/a in B1 über 384'000 t/a in B2 bis zu 413'000 t/a in B3/B4. Auch diese Mengen werden der KWK-Anlage gutgeschrieben.

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 6.2.1.

Man sieht, daß bei dieser Ausführung der Kraft-Wärme-Kopplung mit hohen Stromkennzahlen das 3.1 bis 4.2-fache der CO₂-Menge eingespart werden kann, die ansonsten ohne KWK nur durch die Wärmebereitstellung vor Ort emittiert würde.

Es ergeben sich die in Tabelle 3.5 dargestellten Gesamtreduktionen:

Tabelle 3.5 Gesamte CO₂-Emissionsminderung der Basisvarianten

Variante	B1	B2	B3	B4
Gesamt	221'000 t/a	267'000 t/a	296'000 t/a	296'000 t/a
		+21%	+34%	+34%

3.2.4.1 Schaltung mit Kondensator ist am effizientesten

Derartige, hoch effiziente Anlagen dürfen nicht durch ein nicht sachgerechtes Regelwerk verhindert werden. Die Kriterien zur Definition und Effizienz von KWK müssen vielmehr technologieunabhängig sein und diese Anlagen befördern.

3.2.5 Effizienzkriterien

Für die ökologische Bewertung von KWK-Anlagen werden verschiedene Kennzahlen mit sehr unterschiedlicher Zielgenauigkeit genutzt. Eine ausführlichere Diskussion findet sich im Anhang (Kap.6.1) oder z. B. im Positionspapier „KWK im liberalisierten Markt“¹.

3.2.5.1 KWK-Wirkungsgrad

KWK-Anlagen haben einen höheren Brennstoffbedarf als reine Kesselanlagen zur Bereitstellung von Wärme. Die Differenz zwischen dem Brennstoffbedarf der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage und der reinen Kesselanlage ist der zusätzliche Brennstoffbedarf der KWK.

Die erzeugte elektrische/mechanische Arbeit im Verhältnis zu diesem zusätzlichen Brennstoffbedarf ist als KWK-Wirkungsgrad definiert.

¹ Tolle, Arnold, KWK im Liberalisierten Markt, u.a.: Arbeitspapier zum Vortrag in der Arbeitsgruppe KWK-Ausbauregelung im BMWI am 15.11.2000
auch unter „Neu/Downloads“ auf www.tolle.de

3.2.5.1.1 Effizienz des zusätzlichen Brennstoffs für die KWK

Der KWK-Wirkungsgrad beschreibt also die **Effizienz** dieses **zusätzlichen Brennstoffs**. Er erlaubt daher direkt, die Effizienz der Kraft-Wärme-Kopplung auch im Vergleich zu anderen, mit fossilen Brennstoffen beheizten Kraftwerken zu bewerten, die nicht in KWK betrieben werden. (s.a. www.tolle.de).

Zertifizierbarer KWK-Strom in diesem Sinne soll **niedrigere, spezifische Emissionen** aufweisen **als Strom aus jedem anderen, mit fossilen Brennstoffen beheiztem Kraftwerk**. Als Zertifizierungskriterium gilt daher:

Der KWK-Wirkungsgrad beträgt mindestens 60 %:

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

Dies gilt sowohl für Strom als auch für mechanische Energie.

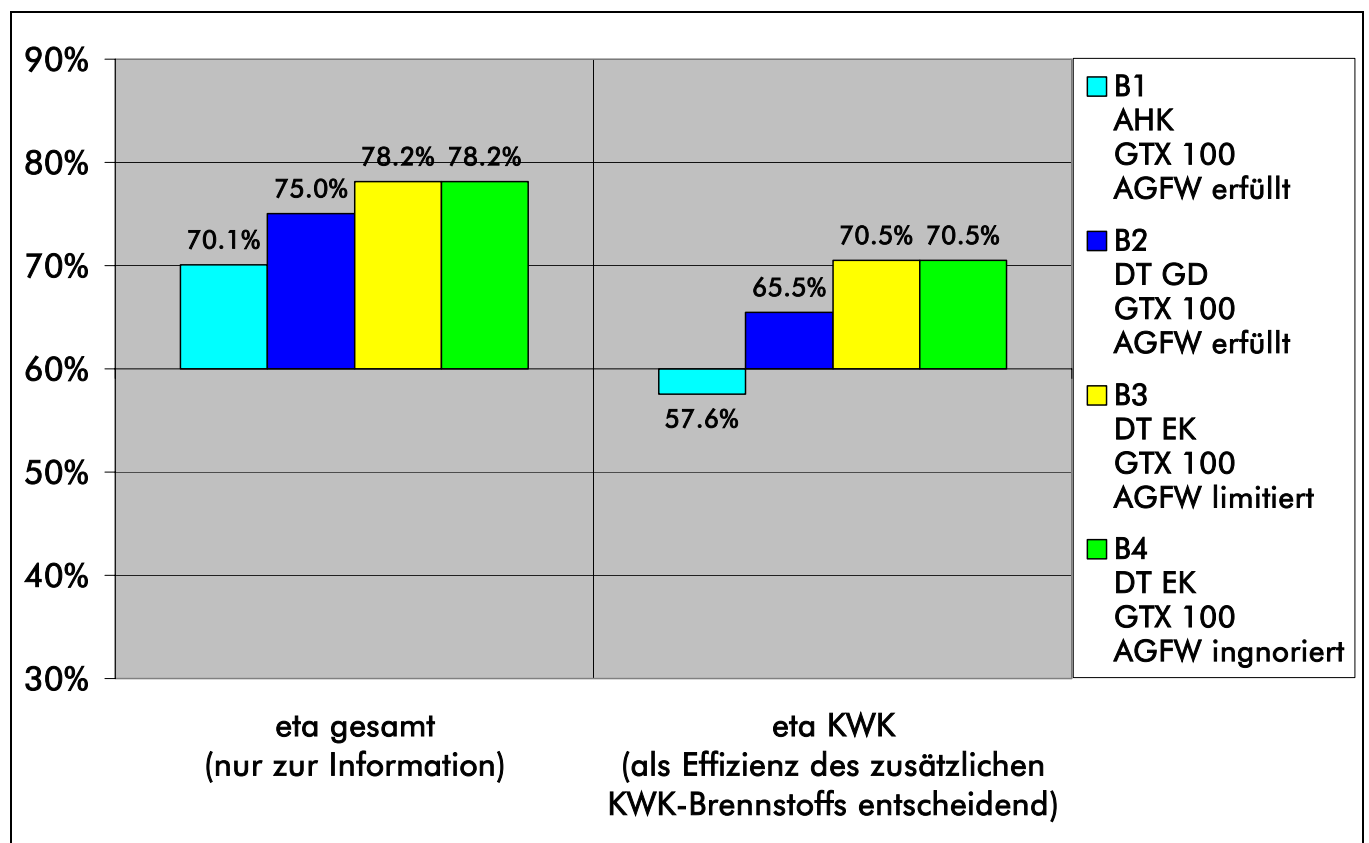


Bild 3.2 Gesamt-Wirkungsgrad und KWK-Wirkungsgrad

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.

3.2.5.2 AGFW-Kriterium

Bild 3.2 zeigt deutlich, daß die technisch identischen Varianten B3 und B4 die mit Abstand effizientesten Anlagen darstellen. Sie werden dennoch durch das AGFW-Kriterium limitiert. Die Berechnung wird im Anhang 6.4 erläutert.

Die daraus resultierenden wirtschaftlichen Konsequenzen werden in 3.2.6 aufgezeigt.

3.2.5.3 Gesamtnutzungsgrad

Der Gesamtnutzungsgrad ist nur in Verbindung mit der Stromkennzahl als Kriterium zur Bewertung der Güte von KWK-Anlagen geeignet.

Gleichwohl zeigt Bild 3.2, daß natürlich auch der Gesamtnutzungsgrad von B3/B4 mit 78.2% höher ist als von B1 (70.1%) bzw. B2 (75.0%).

Obwohl B1 (Gasturbine mit Abhitzekessel) 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.

Daß der Gesamtnutzungsgrad allein zur Beurteilung von KWK-Prozessen nicht geeignet ist, zeigt eine weitere Überlegung: Der Nutzungsgrad des Ersatzkessels: beträgt 91%. Er ist in allen Fällen gleich und damit deutlich höher als der Gesamtnutzungsgrad aller vier Varianten in Bild 3.2. Tatsächlich findet natürlich in den Kesselanlagen überhaupt keine Kraft-Wärme-Kopplung und damit auch keine Emissionsminderung statt. Der Nutzungsgrad allein sagt also nichts über die Qualität der KWK aus.

3.2.6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die wirtschaftliche Situation detailliert Bild 3.3. Das wirtschaftliche Gesamtergebnis stellt sich als Differenz großer Summen dar (Bild 3.4).

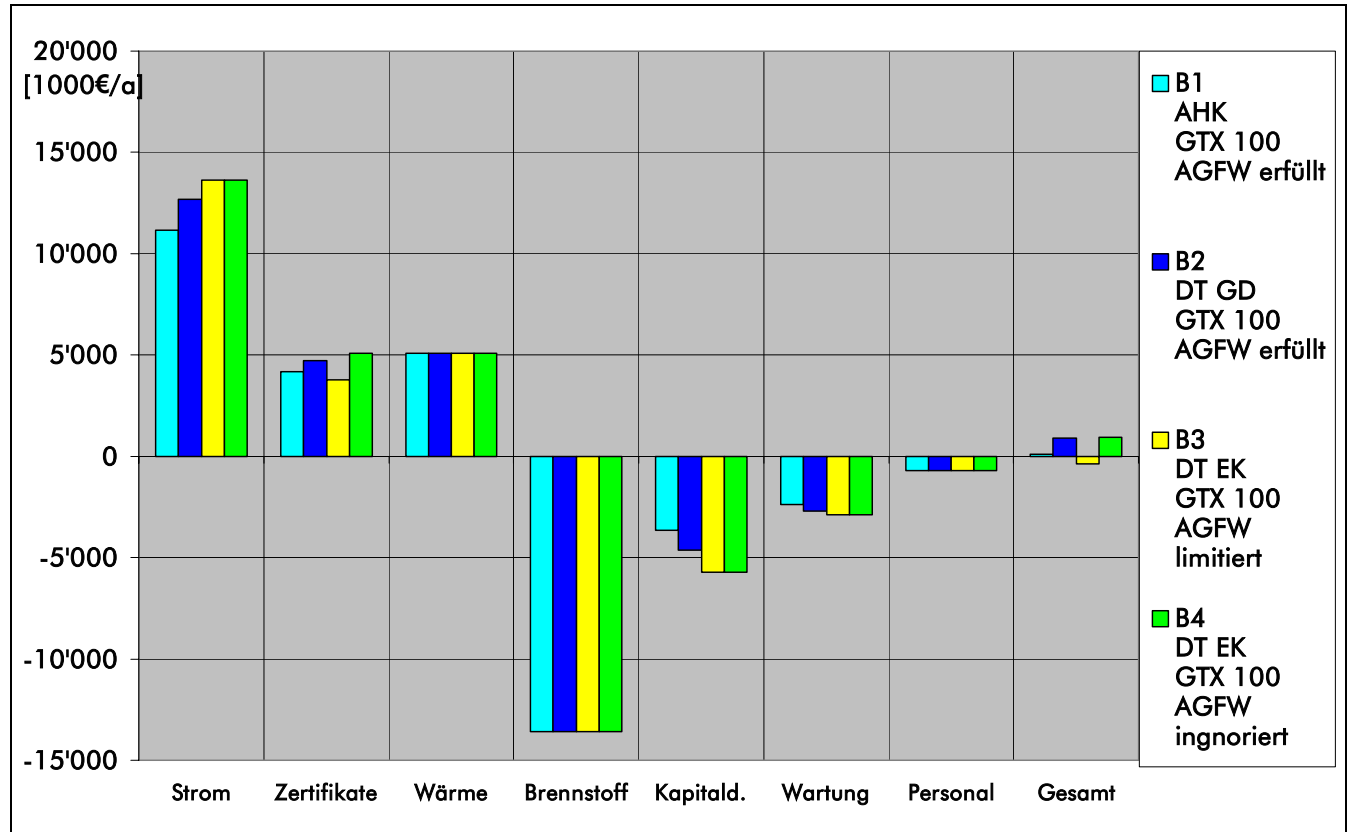


Bild 3.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit von vier verschiedenen KWK-Modellen. Gleiche Daten wie in Bild 3.1, Basisdaten s. Kap. 3.1

Das wirtschaftliche Gesamtergebnis stellt sich als Differenz großer Summen dar. Die effizienteste Anlage erhält bei Anwendung der AGFW-Kriterien die wenigsten Zertifikate.

Die Einnahmen des Projektes basieren auf dem Verkauf von Strom, Wärme und Zertifikaten/Boni. Die Erlöse aus dem Wärmeverkauf sind in allen vier Fällen definitionsgemäß gleich. Die Erträge aus dem Stromverkauf sind proportional der elektrischen Leistung.

Die Kosten werden dominiert durch den Brennstoffbedarf: da in allen vier Varianten die gleiche Gasturbine eingesetzt wird und keine Zusatzfeuerung vorhanden ist, ergeben sich auch hier gleiche Werte. Der Kapitaldienst spiegelt die unterschiedlichen Investitionskosten wieder. Die Wartung ist proportional der elektrischen Leistung angesetzt.

3.2.6.1 Effizienteste Anlage erhält wenigste Zertifikate

Eine Auffälligkeit in Bild 3.3 ergibt sich beim Vergleich der Einnahmen aus Zertifikaten/Boni: durch die Anwendung der AGFW-Kriterien erhält die Variante B3 deutlich weniger Zertifikate als die Variante B1, obwohl B3 deutlich effizienter ist als B1, wie in 3.2.4 und 3.2.5 gezeigt wurde.

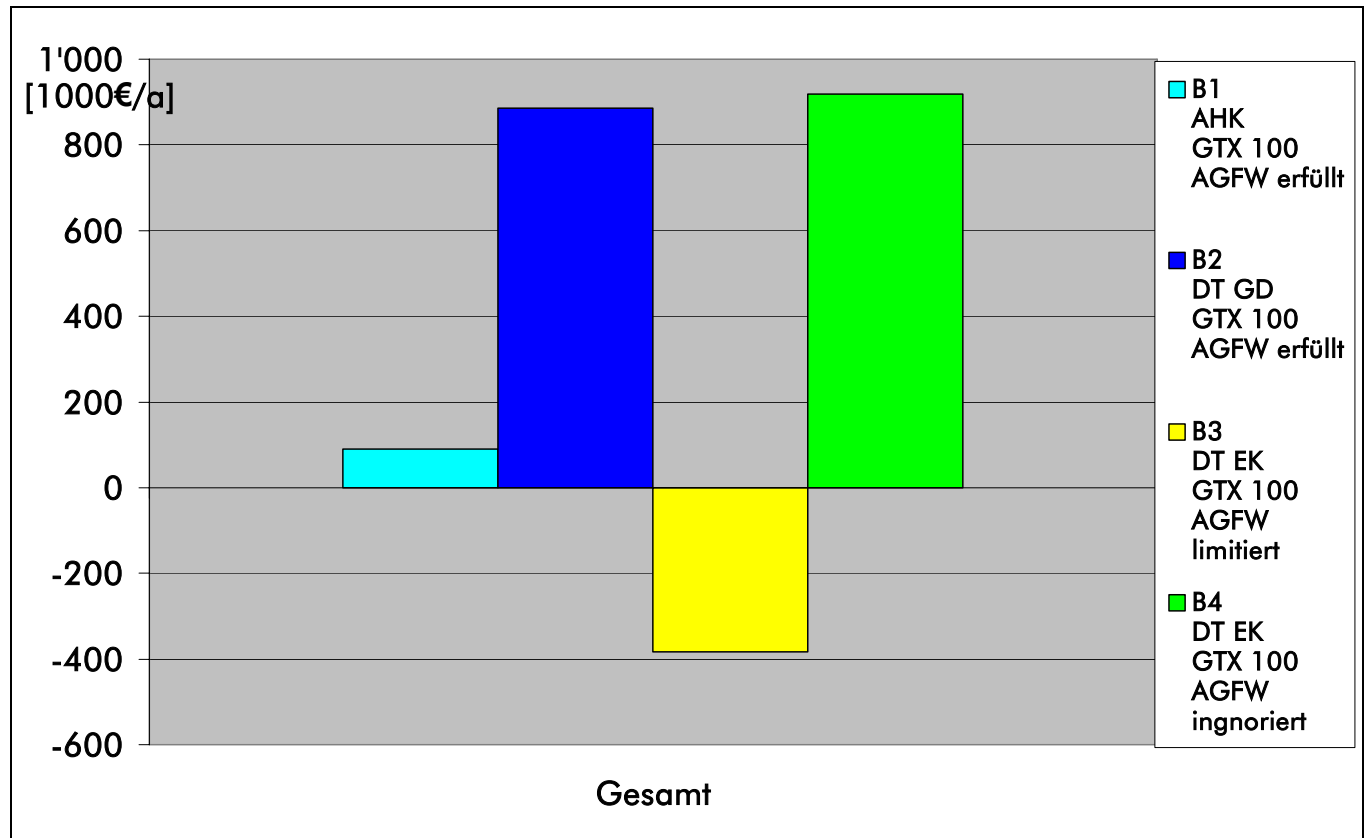


Bild 3.4 Wirtschaftliches Gesamtergebnis von vier verschiedenen KWK-Modellen. Auszug aus Bild 3.3, Basisdaten s. Kap. 3.1

Zur Nutzung der effizientesten Lösung B4 ist die Zertifizierung über den KWK-Wirkungsgrad (Effizienz des zusätzlichen Brennstoffs) notwendig. Bei Anwendung der AGFW-Kriterien läßt sie sich nicht realisieren (B3).

3.2.7 Ökologische Optimierung über KWK-Wirkungsgrad

Eine Zertifizierung über die Effizienz des zusätzlichen Brennstoffs oder den KWK-Wirkungsgrad erlaubt die Realisierung der ökologisch überlegenen Schaltung B4.

3.2.7.1 AGFW-Kriterien verhindern effizienteste Anlage

B3 u. B4 sind technisch identisch und um +21% bzw. +34% effizienter als B1 bzw. B2. Es ist jedoch offensichtlich, dass sich bei Anwendung der AGFW-Kriterien die technologisch effizienteste Lösung B3 nicht realisieren läßt.

3.2.7.2 Kapital erforderlich

Auch wird deutlich, daß bei Gewährung der Bonnie/Zertifikate für B4 keinesfalls Windfallprofits generiert werden: die zusätzlichen Erlöse aus Stromverkauf und Zertifikaten reichen gerade, um den Kapitaldienst für die Erweiterung der Dampfturbine um einen Kondensationsteil zu decken.

3.2.8 Regelungsmöglichkeit mit Teilkondensator gegeben

Die Varianten B1 und B2 lassen sich ohnehin kaum realisieren, da sie de facto über keinerlei Möglichkeiten zur Leistungsregelung verfügen. In der Praxis müßte daher für diesen Anwendungsfall eine deutlich kleinere Gasturbine gewählt werden und die Dampferzeugung über eine Zusatzfeuerung angepaßt werden. Dies führt zu einer deutlichen Verringerung der Emissionsminderung. (s. Kap. 3.3.4)

Die in dieser Betrachtung mit vier gleichen Gasturbinen effizienteste Lösung B3/B4 verfügt dagegen über den integrierten Kondensationsteil über ein hervorragendes Instrument zur Ausregelung des Wärmebedarfs.

3.3 Weitere Schaltungen (Grundlastbetrieb)

Nachfolgend werden weitere Schaltungen für die Versorgung des in 3.1 beschriebenen Industriestandortes vorgestellt. Dazu gehören eine kleinere Gasturbine mit Zusatzfeuerung zur Regelung des Wärmebedarfs und eine größere Gasturbine. (Tabelle 3.6)

Sie werden ebenfalls hinsichtlich Emissionsminderungspotential, thermodynamischer Güte und natürlich Wirtschaftlichkeit analysiert. Die Ergebnisse werden zusammen mit den Schaltungen der Basisvarianten vorgestellt.

3.3.1 Kleinere Gasturbine

Die kleinere Gasturbine wurde gewählt, da so bei Anwendung der AGFW-Kriterien der Wärmebedarf über die Zusatzfeuerung ausgeregelt werden kann.

3.3.1.1 K1 Kleinere Gasturbine mit Abhitzeessel (AHK)

Um auch mit der kleineren Gasturbine nach wie vor den gleichen Wärmebedarfs des industriellen Verbrauchers zu decken, muß der Abhitzeessel mit einer Zusatzfeuerung versehen werden.

3.3.1.2 K2 Kleinere Gasturbine mit AHK und DT in Gegendruck-Schaltung

Es wird die gleiche Gasturbine wie in K1 eingesetzt. Der Kessel wird als Hochdruckkessel mit zweiter Druckstufe ausgeführt. Der Hochdruckdampf wird über eine Dampfturbine in Gegendrucksschaltung entspannt. Aufgrund der zusätzlichen Stromerzeugung in der Dampfturbine steigt der Wärmebedarf im Kessel. Deswegen muß auch die Leistung der Zusatzfeuerung erhöht werden.

3.3.2 Größere Gasturbine

Gegenüber der Basisvariante wird eine um 57% größere Gasturbine gewählt.

3.3.2.1 G1 Gasturbine mit AHK

Da in den aktuellen Entwürfen für das neue KWK-Gesetz zur Zeit keine Effizienzkriterien vorgesehen sind, kann auch diese große Gasturbine nur mit Abhitzeessel ausgestattet werden. Das AGFW Kriterium ist erfüllt.

3.3.2.2 G2 Gasturbine mit AHK und DT in Gegendruckschaltung

Mit derselben Gasturbine wie in G1 wird wieder eine Dampfturbine in Gegendruckschaltung ergänzt. Das AGFW Kriterium ist erfüllt.

3.3.2.3 G3/G4 GT mit AHK und DT in Entnahme-/Kond.-Schaltung

Ähnlich wie in der Basisschaltung B3/B4 wird auch hier durch eine wesentlich bessere Wärmeübertragung im Kessel die Dampfausbeute deutlich gesteigert. Die thermodynamische Arbeitsfähigkeit des zusätzlich gewonnenen Dampfes wird im Kondensationsteil der Dampfturbine bis auf Umgebungsniveau genutzt.

Dies führt insgesamt zu niedrigsten Abgastemperaturen und einer Maximierung der thermodynamischen Effizienz.

3.3.2.4 G5 GT und DT in Entn.-/Kond.-Schaltung mit Zwischenüberhitzung (ZÜ)

Ergänzend zur Schaltung G4 ist hier der Dampfprozeß mit Zwischenüberhitzung (ZÜ) ausgeführt. Hierdurch kann die Stromausbeute und damit der Wirkungsgrad noch einmal leicht gesteigert werden.

Das AGFW-Kriterium wird ignoriert und der gesamte Strom zertifiziert.

3.3.3 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf

Die elektrische Leistung und der Brennstoffbedarf (Hu) der zusätzlichen Varianten sind Tabelle 3.6 zu entnehmen.

Tabelle 3.6 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf der zusätzlichen Varianten

Variante	K1	K2	G1	G2	G3	G4	G5
Typ	AHK	DT GD	DT AHK	DT GD	DT EK	DT EK	DT EK ZÜ
Gasturbine	RR RB211	RR RB211	V64.3A	V64.3A	V64.3A	V64.3A	V64.3A
Zertifizierung	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW limitiert	AGFW ignoriert	AGFW ignoriert
Elektrische Netto-Leistung	27.4 MW	31.6 MW	65.6 MW	71.4 MW	90.7 MW	90.7 MW	91.5 MW
Brennstoff (Hu) gesamt	80.9 MW	85.4 MW	191 MW	191 MW	191 MW	191 MW	191 MW
davon Zusatzfeuerung	2.6 MW	7.2 MW					

3.3.4 CO₂-Emissionen und -Reduktionen

Bild 3.5 zeigt ähnlich Bild 3.1 die CO₂-Emissionen sowohl am Standort selbst auch die dadurch erzielbaren Reduktionen in externen Kraftwerken. Das Gesamtergebnis ist noch einmal in Bild 3.6 zusammengefasst.

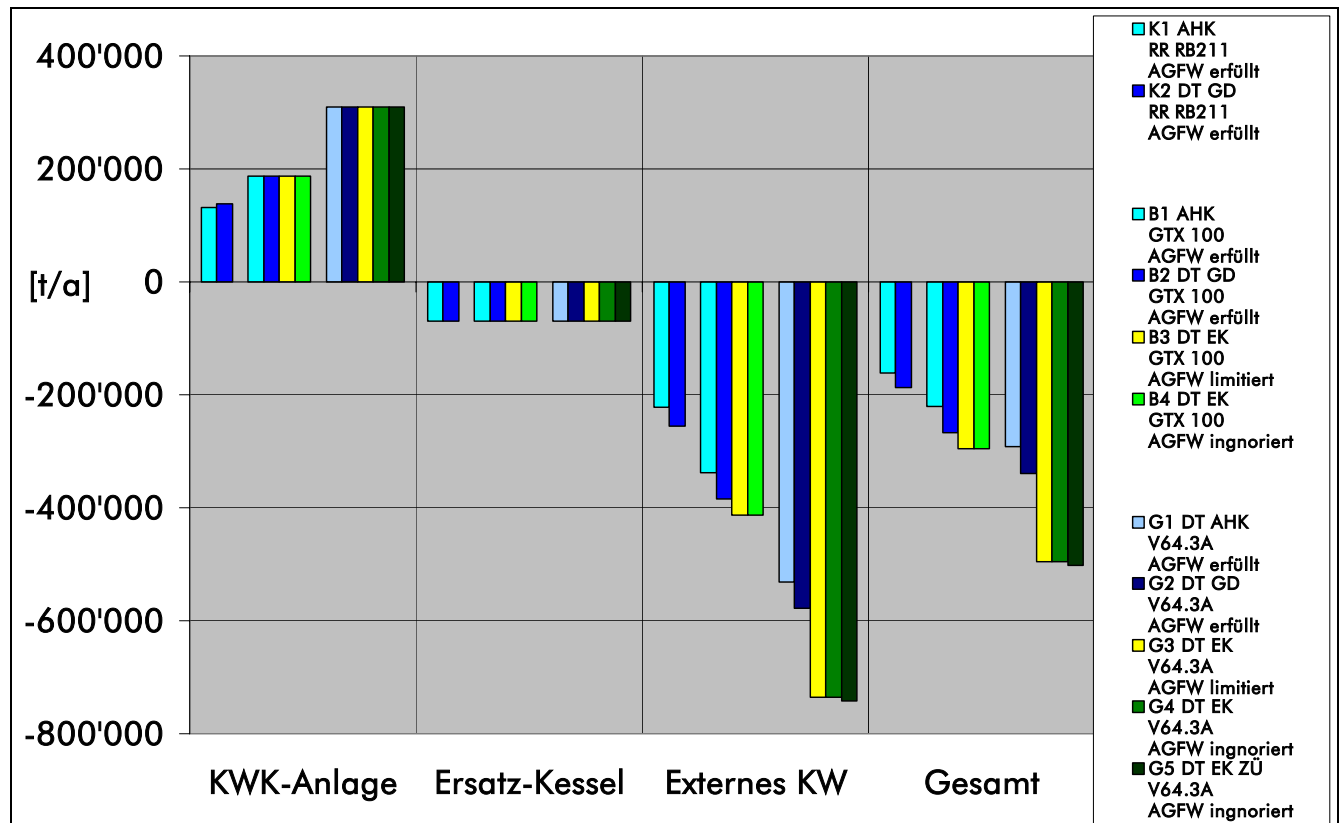


Bild 3.5 Analyse der CO₂-Emissionen bei Versorgung einer Industrieanlage mit 3 Gasturbinen in unterschiedlichen Schaltungen jeweils gleicher Nutz-Wärmebedarf: 39.4 MW, Grundlastbetrieb: 8'100 h/a

In Bild 3.5 sind zunächst die durch die Zusatzfeuerung bedingten, geringfügig höheren Emissionen der GuD-Schaltung K2 gegenüber der reinen Gasturbinenschaltung K1 zu sehen. Diese werden jedoch aufgrund der höheren Stromausbeute von K2 in den Minderungen im externen Kraftwerk mehr als kompensiert.

Deutlich fällt der Brennstoffmehrbedarf der großen Gasturbine G1-G4 gegenüber der Basisvariante B1-B4 auf. Dem stehen jedoch auch wesentlich höhere Einsparungen in externen Kraftwerken gegenüber.

Der Unterschied zwischen den einfachen KWK-Schaltungen G1 und G2 und der Entnahme-/Kond.-Variante G3/G4 ist jedoch wesentlich höher als bei denen entsprechenden Basisschaltungen B1-B4. Dies ist auf die erheblich niedrigere thermodynamische Güte von G1 und G2 zurückzuführen (s.a. 3.3.5).

Die gesamten Emissionsminderungen der einfachen Schaltungen mit der großen Gasturbine G1 (Abhitzekeessel) und G2 (mit Dampfturbine) liegen auch nur in der gleichen Größenordnung wie die der mittleren Basis-Gasturbine in Entn.-/Kond.-Schaltung B3/B4.

Mit 502'000 t/a ist das CO₂-Minderungspotential der großen Gasturbine in Entnahme-/Kond.-Schaltung mit ZÜ G5 sehr groß. (Bild 3.6) 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.

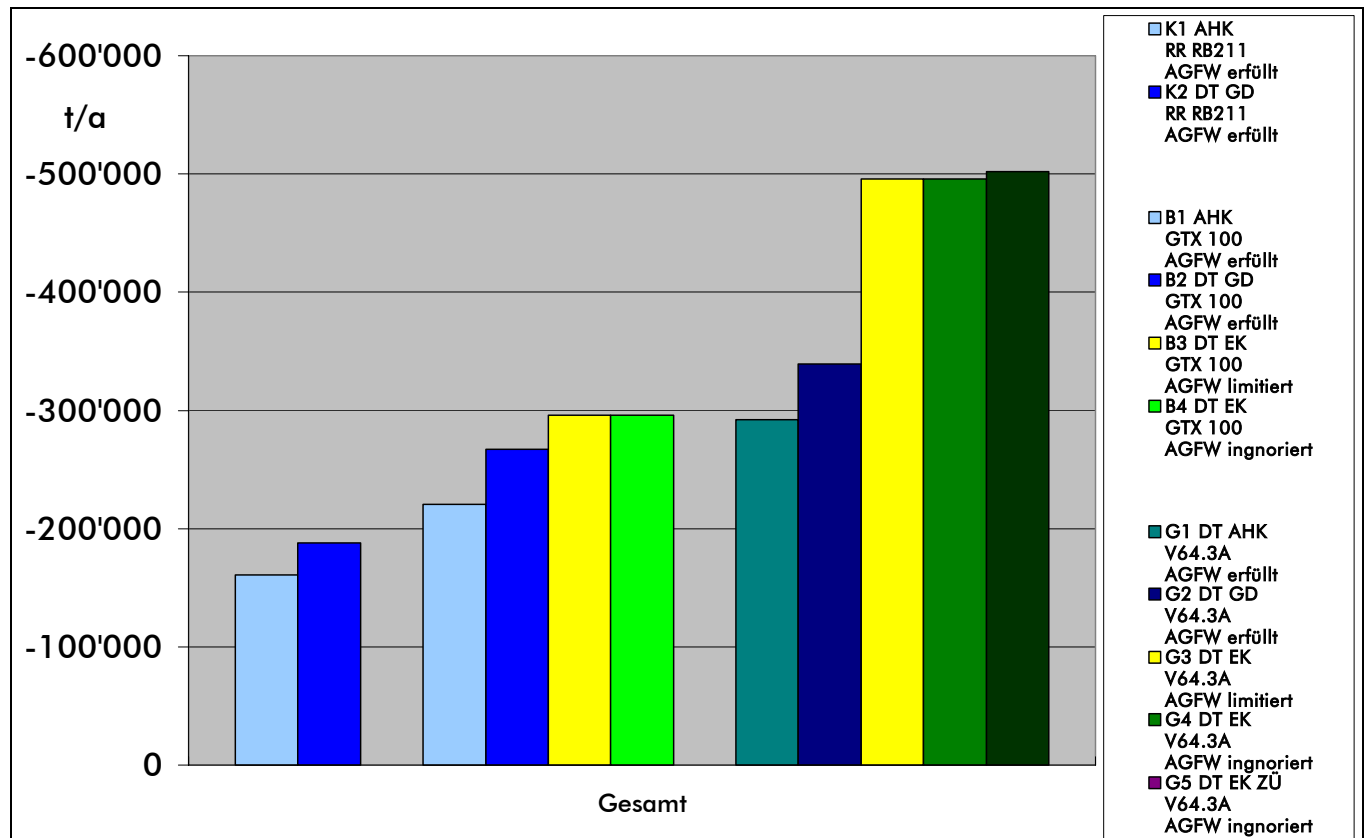


Bild 3.6 Minderung CO₂-Emissionen durch industrielle KWK-Anlagen (Ergebnis von Bild 3.5)

Die Zertifizierung nach dem KWK-Wirkungsgrad führt im Grundlastbetrieb bei einem Nutz-Wärmebedarf von knapp 40 MW zu einer Reduktion von jährlich einer halben Million Tonnen CO₂.

Bei Anwendung des AGFW-Kriteriums wird dagegen aufgrund eingeschränkter Regelungsmöglichkeiten nur etwa ein Drittel dieser Menge eingespart.

3.3.5 Ökologische Güte

In wie schon erwähnt ist für die ökologische Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung der Vergleich mit anderen Kraftwerken entscheidend. Dies soll durch die Effizienz des zusätzlich eingesetzten Brennstoffs bzw. den KWK-Wirkungsgrad geschehen. Die Schaltungen mit der kleineren Gasturbine erfüllen voll dieses Kriterium $\eta_{KWK} \geq 60\%$.

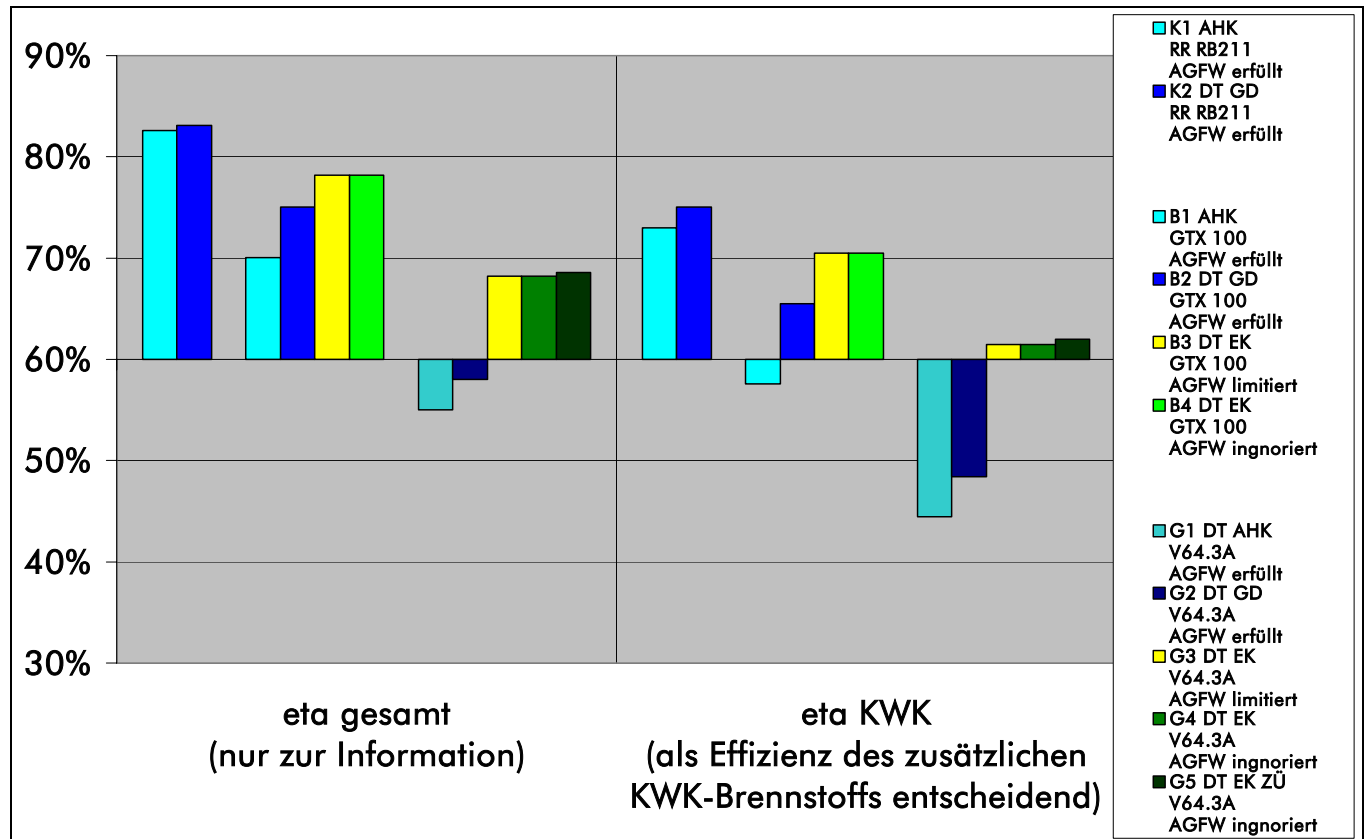


Bild 3.7 Gesamt-Wirkungsgrad und KWK-Wirkungsgrad der Gasturbinenschaltungen

G1 und G2 erfüllen das AGFW-Kriterium, dennoch wird der Brennstoff deutlich schlechter als in einem GuD-Kraftwerk ohne KWK verstromt.

Das in Bild 3.6 gezeigte, sehr große Reduktionspotential von G4/G5 wird mit einem KWK-Wirkungsgrad von 61%/62% erreicht. Der Strom wird damit günstiger als in irgend einem anderen Kraftwerk ohne KWK erzeugt.

Auffällig sind die sehr niedrigen KWK-Wirkungsgrade von G1 bzw. G2. Mit $\eta_{KWK} = 44\%$ bzw. $\eta_{KWK} = 48\%$ wird der für die KWK zusätzlich eingesetzte Brennstoff deutlich schlechter verstromt als in einem neuen GuD-Kraftwerk ohne KWK.

Da im aktuellen Entwurf des KWK-Gesetzes keinerlei Effizienzkriterien vorhanden sind, werden diese Schaltungen jedoch gefördert.

3.3.5.1 KWK-Wirkungsgrad sichert ökologische Qualität

In Entn.-/Kond.-Schaltung erfüllt die große Gasturbine dagegen mit $\eta_{\text{KWK}} = 61\%/62\%$ das Effizienzkriterium KWK-Wirkungsgrad. Es ist daher sichergestellt, daß der zusätzliche Brennstoff besser als in einem neuen, großen mit Gas gefeuerten GuD-Kraftwerk verstromt wird.

Die Stromkennzahl der hier etwa maximal realisierbaren Anlage G4/G5 beträgt $S = 2.3$.

Hier zeigt sich auch die Wirksamkeit der Zertifizierung durch den KWK-Wirkungsgrad: Eine noch größere Anlage kann kaum noch über den KWK-Wirkungsgrad zertifiziert werden, da dann der Grenzwert $\eta_{\text{KWK}} \geq 60\%$ nicht mehr erreicht wird.

3.3.6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die wirtschaftlichen Details sind Bild 3.8 zu entnehmen. Das wirtschaftliche Gesamtergebnis (s.a. Bild 3.9) stellt sich auch hier wieder sehr deutlich als Differenz großer Summen dar.

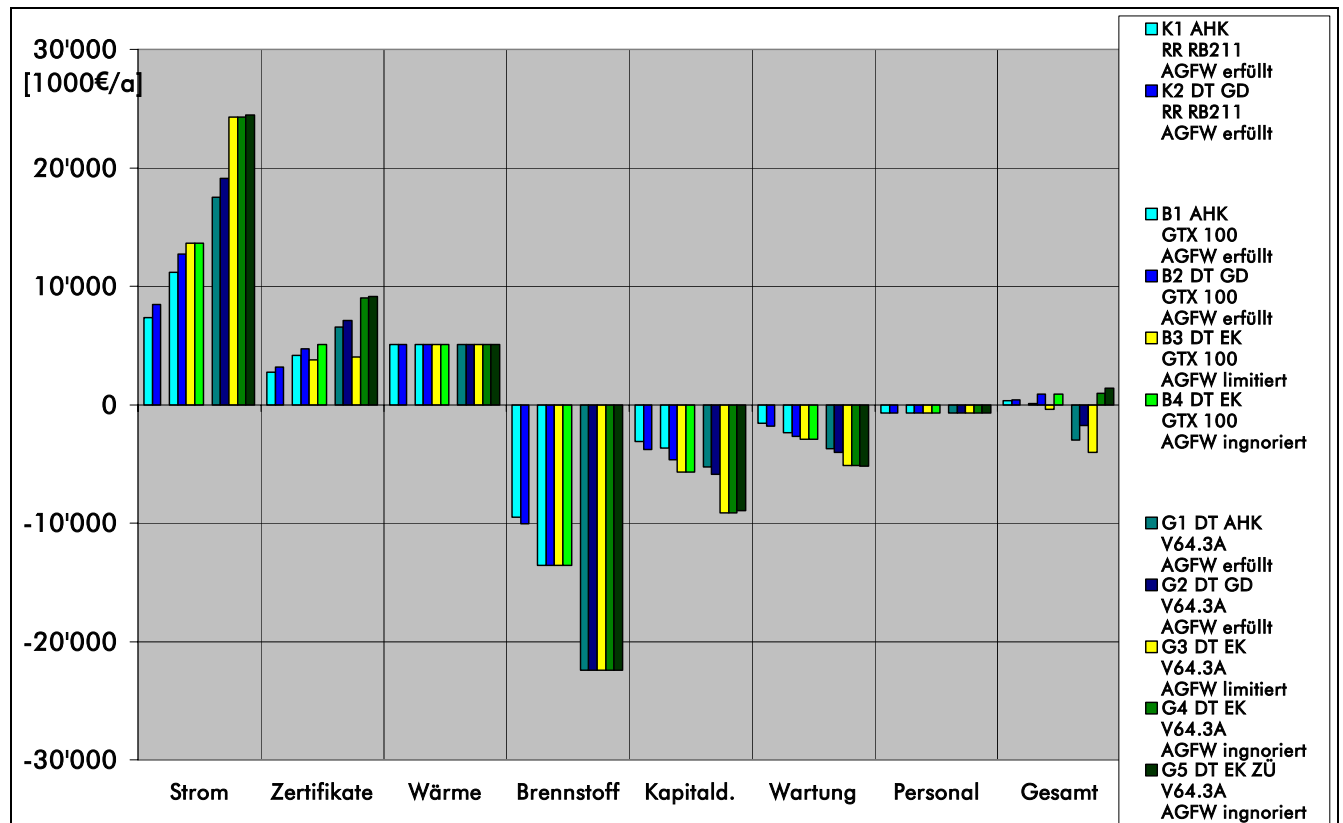


Bild 3.8 Wirtschaftlichkeitsanalyse von drei Gasturbinen in verschiedenen KWK-Schaltungen. Gleiche Daten wie in Bild 3.5, Basisdaten s. Kap. 3.1

Zunächst fallen die großen Unterschiede der drei Gasturbinen besonders bei den Stromverkaufserlösen und den Brennstoffkosten auf.

Auch beim Kapitaldienst und damit in den Investitionskosten zeigen sich große Unterschiede. Besonders die hocheffizienten Schaltungen der großen Gasturbine ragen deutlich aus dem Umfeld heraus.

Deutlich niedriger sind dagegen die Investitionskosten der einfachen Schaltungen mit der großen Gasturbine G1 und G2: sie liegen in der gleichen Größenordnung wie die Entn.-/Kond.-Schaltungen der mittleren Gasturbine. Der Grund dafür sind die einfachen Schaltungen und die kleinen Heizflächen der Abhitzeessel.

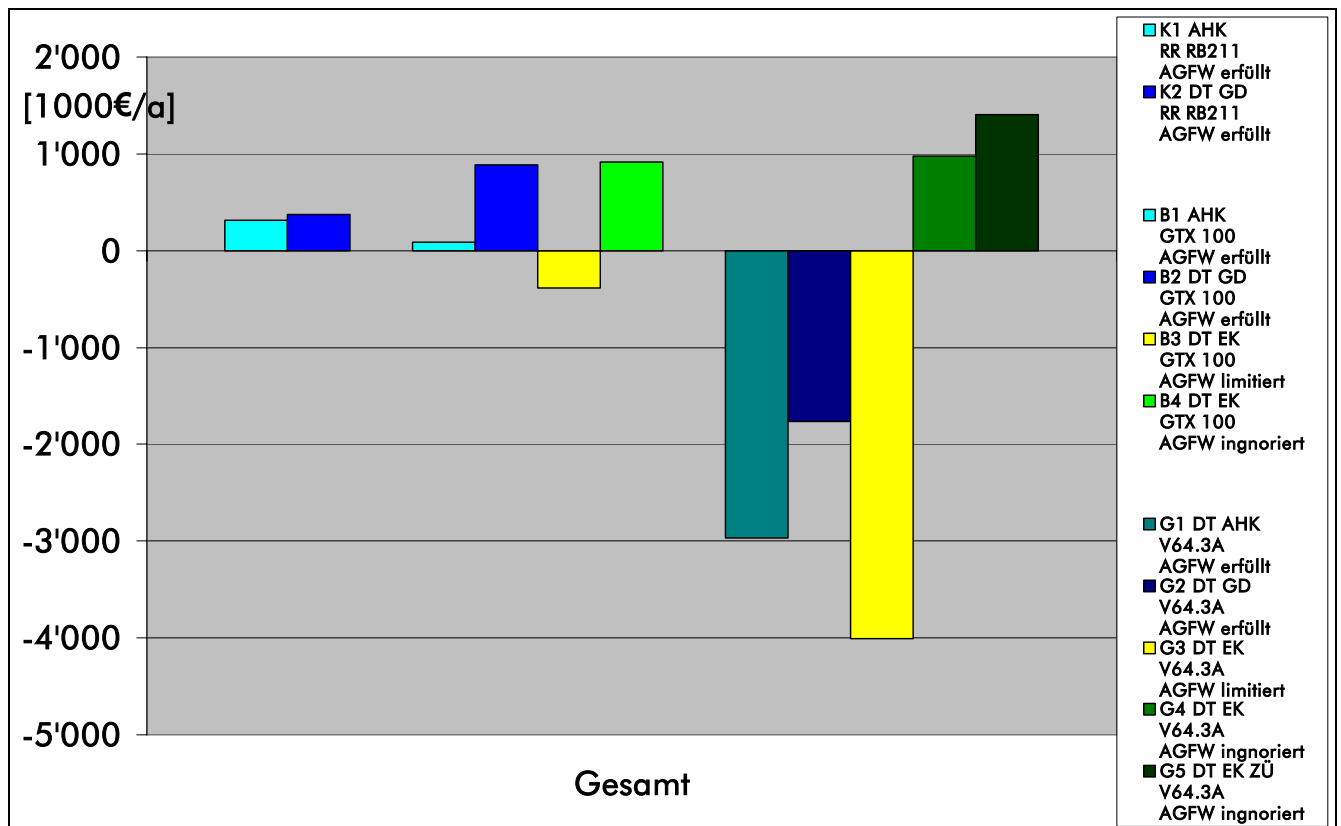


Bild 3.9 Wirtschaftliches Gesamtergebnis von drei Gasturbinen in verschiedenen KWK-Schaltungen.
Auszug aus Bild 3.8, Basisdaten s. Kap. 3.1

Die Lösung mit den größten Reduktionen G3 führt bei Anwendung der AGFW-Kriterien große wirtschaftliche Verluste ein.

Die effizienten Schaltungen B4 und G4/G5 mit großem Reduktionspotential sind nur über den KWK-Wirkungsgrad zu zertifizieren.

3.3.6.1 Große Gasturbinen: Mehr Boni für mehr Emissionen?

Die Erträge aus Zertifikaten/Boni liegen bei der großen Gasturbine bei Anwendung der AGFW-Kriterien G3 in der gleichen Größenordnung wie bei der entsprechenden Schaltung der mittleren Gasturbine B3. Sie sind damit immer noch niedriger als B1/B2.

Noch viel größer fällt der Unterschied gegenüber den einfachen Schaltungen mit der großen Gasturbine aus:

Obwohl G1/G2 den zusätzlichen Brennstoff gegenüber GuD-Kraftwerken ohne KWK mit deutlich niedrigerem Wirkungsgrad verstromen (s.a. 3.3.5), erhalten G1/G2 deutlich mehr Boni als die hocheffiziente Schaltung G3.

3.3.6.2 Effizienteste Anlagen erfordern KWK-Wirkungsgrad

Die große Gasturbine in den einfachen Schaltungen G1/G2 ist im Grundlastbetrieb nicht wirtschaftlich. Dies wird sich bei geringeren jährlichen Benutzungsstunden im Schichtbetrieb ändern. Die Entn.-/Kond.-Schaltung G3 führt bei Anwendung der AGFW-Kriterien zu hohen Verlusten. Dies gilt auch für die effizienteste Schaltung G5: auch sie wäre bei Anwendung der AGFW-Kriterien nicht realisierbar.

3.3.6.3 Zwischenüberhitzung: aktuelle Grenze des technisch Machbaren

Die Zwischenüberhitzung führt in dieser Simulation bei der großen Gasturbine (G5) zu geringfügigen Steigerungen bei den Stromverkaufserlösen und leichten Verringerungen des Kapitaldienstes. Beides führt zu einer Steigerung des Gesamterlöses.

Die geringeren Investitionskosten sind auf eine Verschiebung von Wärmeübertragungsleistung aus dem Ecobereich in den Bereich der Überhitzer mit höheren, treibenden Temperaturdifferenzen und damit spezifisch kleineren Flächen zurückzuführen.

Es ist selbstverständlich, daß diese Ergebnisse besonders in diesem Leistungsbereich auch hinsichtlich der kommerziellen Verfügbarkeit im konkreten Realisierungsfall durch Angebote verifiziert werden müssen.

Die Schaltung wurde in den Vergleich aufgenommen, um die Grenze des technisch Machbaren beim gegenwärtigen Stand der Technik aufzuzeigen. Sie läßt sich nur noch marginal z. B. durch Brennstoffvorwärmung verbessern.

Zu Realisierung ist auch hier eine Zertifizierung durch den KWK-Wirkungsgrad notwendig.

3.3.6.4 Kleinere Gasturbinen: Kein Anreiz für effizientere Schaltung

Wie schon in 3.2.8 erläutert, kann bei Anwendung der AGFW-Kriterien wegen der sonst fehlenden Regelungsmöglichkeit bei den größeren Maschinen nur die kleine Gasturbine realisiert werden. Dabei fällt auf, daß in diesem Beispiel selbst in dieser Leistungsklasse und im Grundlastbetrieb die Schaltung mit Gegendruckdampfturbine G2 gegenüber der reinen Abhitzeessel-Schaltung G1 kaum ein höheres Gesamtergebnis erwirtschaftet.

Es ist also kein ökonomischer Anreiz für die effizientere Schaltung gegeben.

3.4 Szenario Schichtbetrieb

Während die bisherigen Untersuchungen auf einer hohen Auslastung der Anlagen im Grundlastbetrieb (s. 3.1.2) basieren, werden nachfolgend wesentlich niedrigere jährliche Benutzungsstunden im sogenannten Schichtbetrieb angenommen.

3.4.1 Wirtschaftliche Rahmendaten

Das Energiepreinsniveau und die jährlichen Benutzungsstunden sind Tabelle 3.7 zu entnehmen.

Tabelle 3.7 Energiepreise und Benutzungsstunden

Preis Strom	61.00 €/MWh
Preis Bonus	12.30 €/MWh
Preis Brennstoff	14.50 €/MWh
Kapitaldienst	15.0%
Betriebsstunden	3'000 h/a

3.4.2 Emissionsminderung und ökologische Qualität

Technisch sind die vorgestellten Schaltungen mit den Grundlastversionen in 3.2 und 3.3 identisch. Die entsprechenden Kennzahlen sind daher gleich.

Die absoluten Emissionen und damit auch die Emissionsminderung gehen jedoch aufgrund der reduzierten, jährlichen Betriebsstunden erheblich zurück: sie sinken um 63% auf 37%.

3.4.3 Wirtschaftliches Ergebnis

Bei der Analyse in Bild 3.10 fällt auf, daß für den Kapitaldienst höhere Kosten als für den Brennstoff anfallen. Dies hat erhebliche Auswirkungen.

3.4.3.1 Deutlich höhere Strompreise erforderlich

Zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit ist mit 61.00 €/MWh gegenüber 33.00 €/MWh in der Grundlastversion ein wesentlich höherer Strompreis erforderlich.

Auch der Gaspreis wird bei den entsprechend niedrigeren Abnahmemengen höher ausfallen, so daß vermutlich noch höhere Strompreise erforderlich sind.

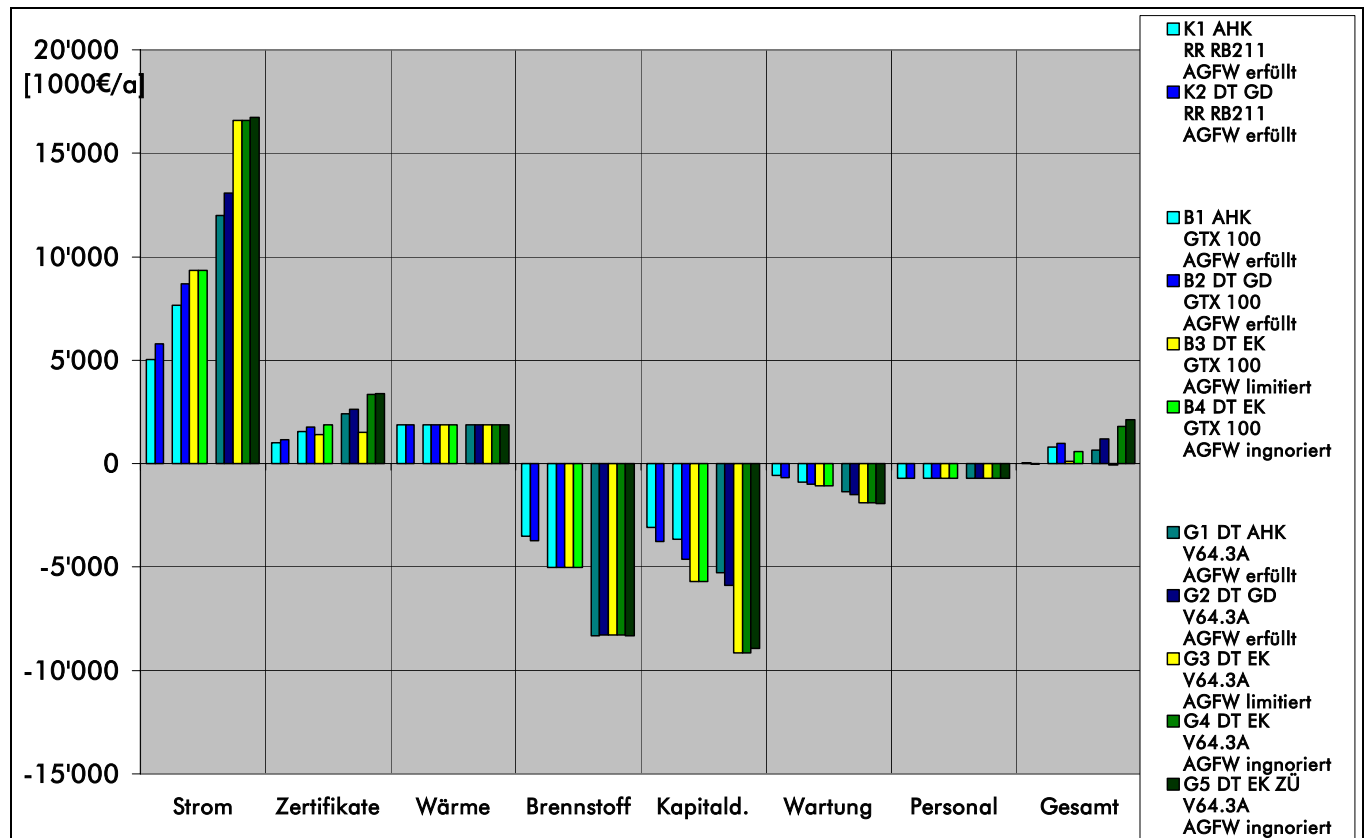


Bild 3.10 Wirtschaftlichkeitsanalyse des Schichtbetriebs: 3'000 h/a

Die Kosten für den Kapitaleinsatz sind höher als die Brennstoffkosten

3.4.3.2 Kleinere Gasturbine: ineffizientere Schaltung wirtschaftlicher

Bei der kleineren Gasturbine ist die Schaltung ohne Dampfturbine K1 deutlich wirtschaftlicher als die effizientere Lösung mit Dampfturbine K2.

Der Abstand zu den größeren Maschinen hat noch mehr zugenommen.

Das wirtschaftliche Gesamtergebnis zeigt jedoch, daß man diese Anlage selbst bei den hohen Strompreisen nicht realisieren wird.

Wie schon in 3.3.1 gezeigt, hat diese Gasturbine als einzige im Vergleich die Größe, bei der der Wärmebedarf noch über die Zusatzfeuerung geregelt und gleichzeitig das AGFW-Kriterium erfüllt werden kann. Wenn geregelt werden muß, wird daher im angegebenen Preisszenario vermutlich gar keine KWK realisiert.

3.4.3.3 Mittlere Gasturbine: ineffizientere Schaltungen wirtschaftlicher

Besonders deutlich ist die Veränderung bei der mittleren Gasturbine: die deutlich ineffizienteren Schaltungen B1/B2 sind deutlich wirtschaftlicher als die hocheffiziente Variante B3/B4, selbst wenn diese über den KWK-Wirkungsgrad zertifiziert wird B4.

3.4.3.4 Große Gasturbine:

Von den im Vergleich zu GuD-Kraftwerken ohne KWK wenig effizienten Schaltungen der großen Gasturbine weist die Schaltung mit Dampfturbine in Gegendrucksschaltung G2 das bessere Ergebnis auf.

Im Schichtbetrieb ist bei Anwendung des AGFW-Kriteriums G2 ohnehin die Lösung mit dem besten Gesamtergebnis.

Gegenüber den kleineren Lösungen würde sich bei sinkenden Erdgaspreisen der Vorteil von G1 und besonders G2 noch weiter erhöhen.

3.4.3.4.1 KWK-Wirkungsgrad unterstützt günstigste Lösung G4/G5

Die Zertifizierung nach dem KWK-Wirkungsgrad fährt auch hier zur Auswahl der Lösung mit dem höchsten Reduktionspotential und gleichzeitig günstigeren spezifischen Emissionen G4/G5.

3.4.3.5 AGFW-Kriterium verhindert ökologisch effizientere Lösungen

Es ist zu erwarten, daß bei Zertifizierung nach dem AGFW-Kriterium einfachen Lösungen der Vorzug gegeben wird. Der Spitzenlastbedarf wird dabei durch vorhandene Dampfkessel ohne Kraft-Wärme-Kopplung abgedeckt.

Bei Zertifizierung nach dem AGFW-Kriterium ist G2 wirtschaftlich am attraktivsten, obwohl der zusätzliche Brennstoff hier mit 48% deutlich schlechter als in einem neuen GuD-Kraftwerk ohne KWK verstromt wird.

Ökologisch effizientere Lösungen zur Abdeckung des Gesamtbedarfs sind demgegenüber technologisch anspruchsvoller und aufgrund der höheren spezifischen Investitionskosten bei Fehlen der Boni aufgrund des AGFW-Kriteriums nicht realisierbar.

3.4.3.6 Zertifizierung durch KWK-Wirkungsgrad befördert effiziente Reduktion

Bei Zertifizierung durch den KWK-Wirkungsgrad wird dagegen die höchste Reduktion erzielt und gleichzeitig der Brennstoff besser als in einem Groß-GuD-Kraftwerk verstromt.

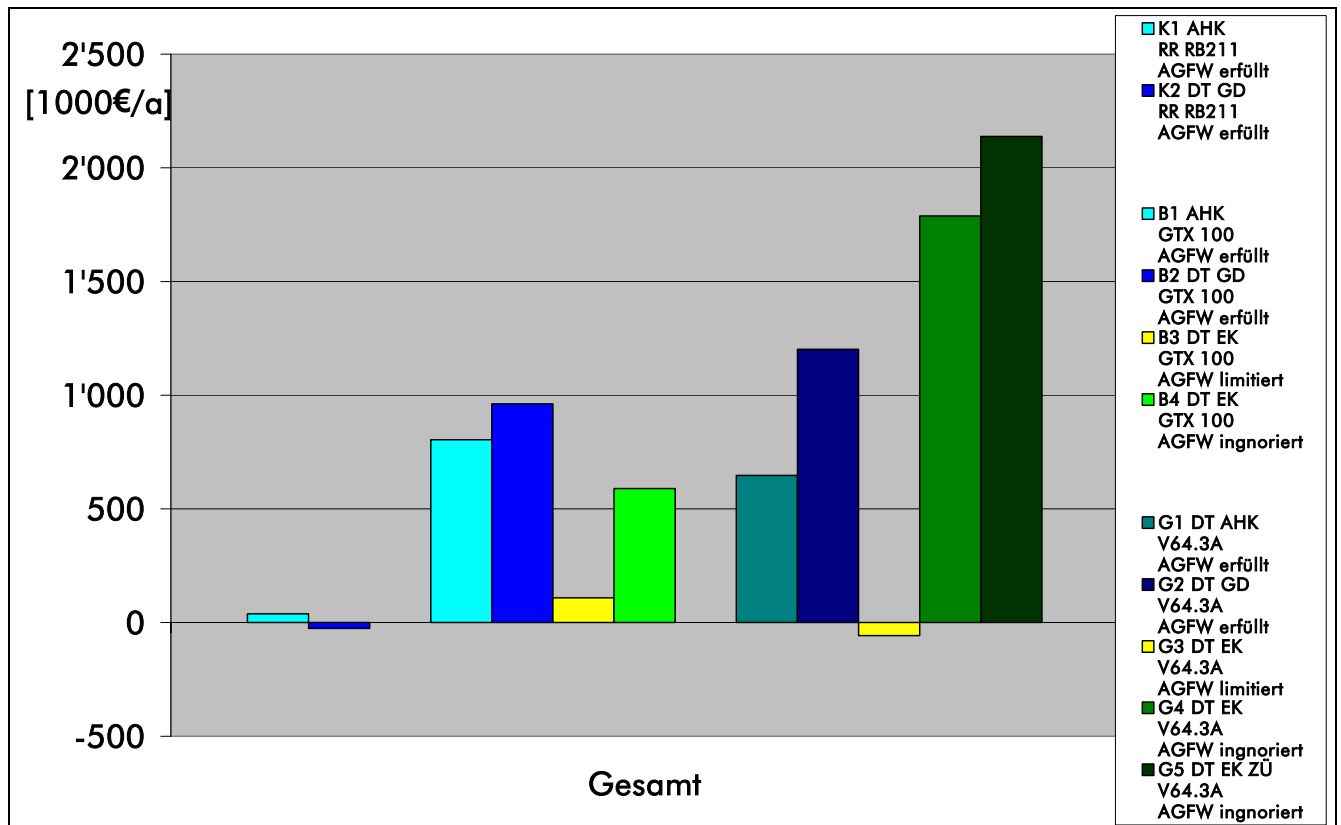


Bild 3.11 Wirtschaftliches Gesamtergebnis im Schichtbetrieb bei reduzierter jährlicher Stundenzahl von 3'000 h/a

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% deutliche schlechter als in einem GuD-Kraftwerk ohne KWK verstromt.

4 Systemvergleich: kleine industrielle KWK-Anlage

Nachdem oben die Situation eines mittelgroßen, industriellen KWK-Betriebes untersucht wurde, sollen in diesem Kapitel die Besonderheiten eines kleineren Standortes vorgestellt werden.

Soweit nicht näher erläutert, gelten die gleichen Randbedingungen wie in Kap. 0.

4.1 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

4.1.1 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 4.1 Prozeßdampfparameter

Dampf Druck	14.0 bar
Dampf Temperatur	220 °C
Dampf Menge	3.53 t/h
Nutz-Wärme	2.4 MW

Es wird angenommen, daß ein Dampf-Verteilnetz mit den Parametern entsprechend Tabelle 3.1 zur Verfügung steht.

4.1.2 Energiepreise

Das Energiepreinsniveau und die jährlichen Benutzungsstunden sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 4.2 Energiepreise und Benutzungsstunden

Preis Strom	90.00 €/MWh
Preis Bonus	22.60 €/MWh
Preis Brennstoff	14.50 €/MWh
Kapitaldienst	15.0%
Betriebsstunden	4'000 h/a

Als Bonuspreis ist der mittlere Preis des im aktuellen Gesetzesentwurf vorgestellten Preismodells bei 10 Jahren Laufzeit für eine Leistung kleiner 2 MW angenommen. (Ausnahme: Varianten S8 und S9)

4.2 Systemvergleich

Nachfolgend werden weitere Schaltungen für die Versorgung des in 4.1 beschriebenen Industriestandortes analysiert. Die angegebenen Beschreibungen der Größenklasse beziehen sich auf den hier vorliegenden Einsatzfall.

4.2.1 Beschreibung der Schaltungen

Der in diesem Leistungsbereich häufige Einsatz von Motoren ist nicht möglich, da mit Motoren das geforderte Temperaturniveau für die Nutzwärme nicht erreicht werden kann.

4.2.1.1 S1 Kleinere GT mit Abhitzeessel (AHK) und Zusatzfeuerung (ZF)

Es wird eine kleinere Gasturbine gewählt, so daß zur Deckung des Wärmebedarfs eine Zusatzfeuerung notwendig ist.

4.2.1.2 S2 Kleinere GT mit AHK und DT in Gegendruck-Schaltung und ZF

Es wird dieselbe Gasturbine wie in S1 eingesetzt. Der Kessel wird als Hochdruckkessel mit zweiter Druckstufe ausgeführt. Der Hochdruckdampf wird über eine Dampfturbine in Gegendrucksschaltung entspannt. Auch hier wird eine Zusatzfeuerung notwendig.

4.2.1.3 S3 Gasturbine mit AHK

Gasturbine und Abhitzeessel werden so gewählt und ausgelegt, daß der Wärmebedarf gedeckt wird.

Der Prozeß kommt ohne Zusatzfeuerung aus.

4.2.1.4 S4 GT mit AHK und DT in GD-Schaltung

Es wird dieselbe Gasturbine wie in S3 eingesetzt. Der Kessel wird als Hochdruckkessel mit zweiter Druckstufe ausgeführt. Der Hochdruckdampf wird über eine Dampfturbine in Gegendrucksschaltung entspannt. Auch hier wird keine Zusatzfeuerung notwendig.

4.2.1.5 S5 Größere GT mit AHK

Es kommt eine nochmals größere Gasturbine ohne Zusatzfeuerung zum Einsatz.

4.2.1.6 S6 Größere GT mit AHK und DT in GD-Schaltung

Wie S5, jedoch mit Gegendrucksdampfturbine.

4.2.1.7 S7 GT -2 MW- mit AHK

Die Leistung der Gasturbine liegt knapp über 2 MW. Für den Bonuspreis wird angenommen, daß die Nettoleistung der Gesamtanlage 2 MW beträgt. Die Anlage wird der Leistungsklasse bis 2 MW zugeordnet.

4.2.1.8 S8 GT -2 MW- mit AHK und GD-DT als große Anlage zertifiziert

Es wird dieselbe Gasturbine wie in S7 eingesetzt. Durch die zusätzliche Dampfturbine in Gegendrucksschaltung erhöht sich die Gesamtleistung der Anlage auf 2.2 MW. Für den Bonuspreis wird die Leistungsklasse größer 2 MW angenommen.

4.2.1.9 S9 GT -2 MW- mit AHK und GD-DT mit Gleitformel zertifiziert

Technisch ist die Schaltung mit S8 identisch, hat also auch dieselbe Leistung. Um die mit S8 gezeigten Nachteile von sprunghaften Änderungen zu vermeiden (s. 4.2.5), erfolgt der Übergang von einer Leistungsklasse in die andere nicht sprunghaft sondern gleitet kontinuierlich über einen größeren Bereich.

Hier: von 2 MW auf 5 MW.

Im vorliegenden Fall ergibt sich mit einer elektrischen Leistung von

2.2 MW

ein Bonus von

21.92 €/MWh.

Variante S9 ist mit diesem Wert gerechnet.

4.2.2 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf

Die elektrische Leistung und der Brennstoffbedarf (Hu) der verschiedenen Varianten sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3 Elektrische Leistung und Brennstoffbedarf der zusätzlichen Varianten

	S1 AHK Turbomeca M BK bis 2 MW	S2 DT GD Turbomeca M BK bis 2 MW	S3 AHK Solar-Saturn BK bis 2 MW	S4 DT GD Solar-Saturn BK bis 2 MW	
Bonus Klasse (BK)					
Elektrische Netto-Leistung	1.0 MW	1.1 MW	1.1 MW	1.3 MW	
Brennstoff (Hu) gesamt davon Zusatzfeuerung	4.3 MW 0.18 MW	4.5 MW 0.37 MW	4.9 MW	4.9 MW	
	S5 AHK P&W ST18A BK bis 2 MW	S6 DT GD P&W ST18A BK bis 2 MW	S7 AHK KHI M1A-23 BK bis 2 MW	S8 DT GD KHI M1A-23 BK ab 2 MW	S9 DT GD KHI M1A-23 BK gleitend
Bonus Klasse (BK)					
Elektrische Netto-Leistung	1.7 MW	1.9 MW	2.0 MW	2.2 MW	2.2 MW
Brennstoff (Hu) gesamt davon Zusatzfeuerung	6.4 MW	6.4 MW	8.2 MW	8.2 MW	8.2 MW

4.2.3 CO₂-Emissionen und -Reduktionen

Bild 4.1 verdeutlicht die CO₂-Emissionen sowohl am Standort selbst auch die dadurch erzielbaren Reduktionen in externen Kraftwerken:

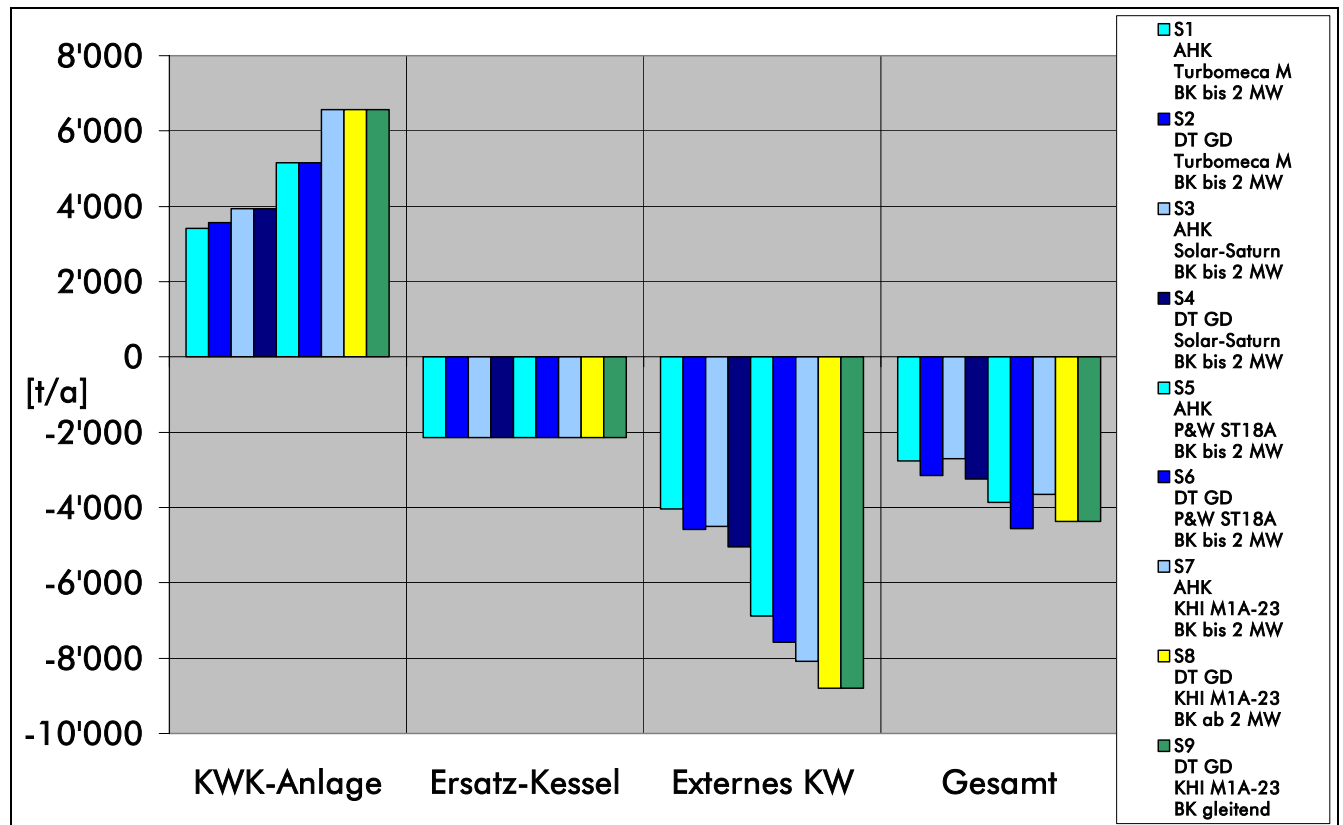


Bild 4.1 CO₂-Emissionen von vier verschiedenen Gasturbinen in KWK, jeweils ohne und mit Gegendruck-Dampfturbine, zur Versorgung eines kleinen Industriebetriebes: gleicher Nutz-Wärmebedarf: 2.4 MW, Benutzungsstunden: 4'000 h/a

Bei den Emissionen der KWK-Anlage vor Ort sieht man, wie im Falle der Varianten S1/S2 die Emissionen noch leicht durch die Zusatzfeuerung steigen und in den nächsten drei GT-Paaren ohne Zusatzfeuerung jeweils konstant sind. S8 und S9 sind technisch identisch und unterscheiden sich nur durch die Zertifizierung.

Bei den Einsparungen des externen Kraftwerkes sowie den gesamten Einsparungen ist jeweils die Steigerung der Emissionsminderung durch Zubau der Dampfturbine klar erkennbar.

Brennstoffleistung und elektrische Leistung sind jeweils proportional den Emissionen der KWK-Anlage und den Emissionsminderungen des externen Kraftwerkes. Die deutliche Leistungssteigerung über die vier Gasturbinen ist so über die Emissionen der KWK-Anlage und des externen Kraftwerkes zu beobachten.

Demgegenüber steigt die Gesamt-Emissionsminderung zunächst nur moderat an und nimmt mit der 4. Gasturbine S7/S8 gegenüber der dritten Gasturbine S6/S7 sogar wieder leicht ab. Hieraus ist bereits auf den abnehmenden Gütegrad der KWK-Anlagen zu schließen.

4.2.4 Ökologische Qualität

Die thermodynamische Güte und damit die ökologische Effizienz ist am KWK-Wirkungsgrad in Bild 4.2 zu erkennen:

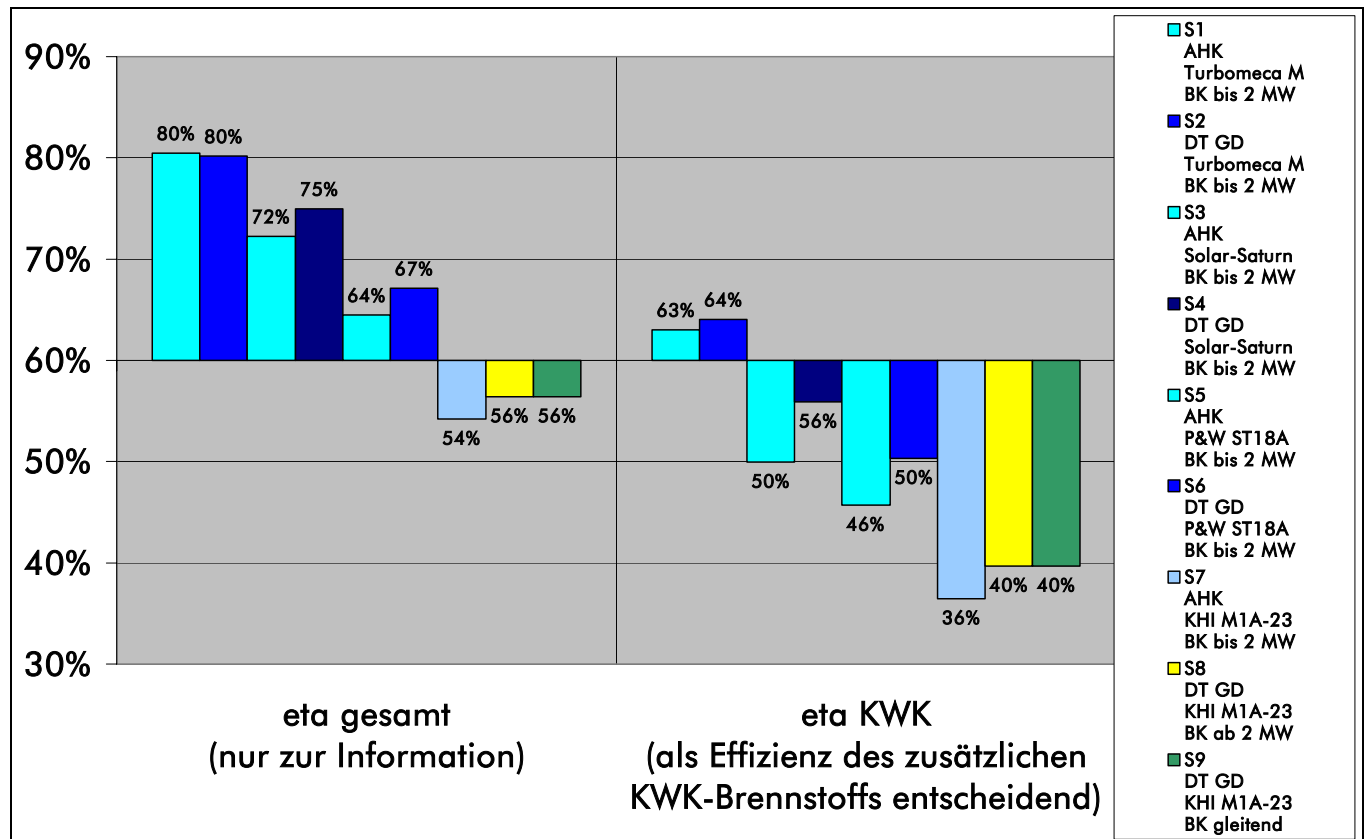


Bild 4.2 Gesamt-Wirkungsgrad und KWK-Wirkungsgrad der kleinen KWK-Anlagen, die alle nach dem aktuellen Gesetzentwurf gefördert werden.

Nur die kleinste Gasturbine (S1 und S2) verstromt den Brennstoff besser als ein neues GuD-Kraftwerk, alle anderen liegen z.T. erheblich darunter.

Auch Gesamtnutzungsgrade von über 70% sind kein Garant für hohe Effizienz.

4.2.4.1 KWK-Wirkungsgrad

Nur die kleine Gasturbinen mit Zusatzfeuerung S1 bzw. S2 erfüllt 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.

4.2.4.2 Gesamtnutzungsgrad als Effizienz-Kriterium nicht geeignet

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

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

Auch hier wird der Brennstoff also ungünstiger als in einem neuen großen GuD-Kraftwerk eingesetzt.

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

4.2.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die wirtschaftliche Situation wird mit Hilfe von Bild 4.3 analysiert und in Bild 4.4 zusammengefasst.

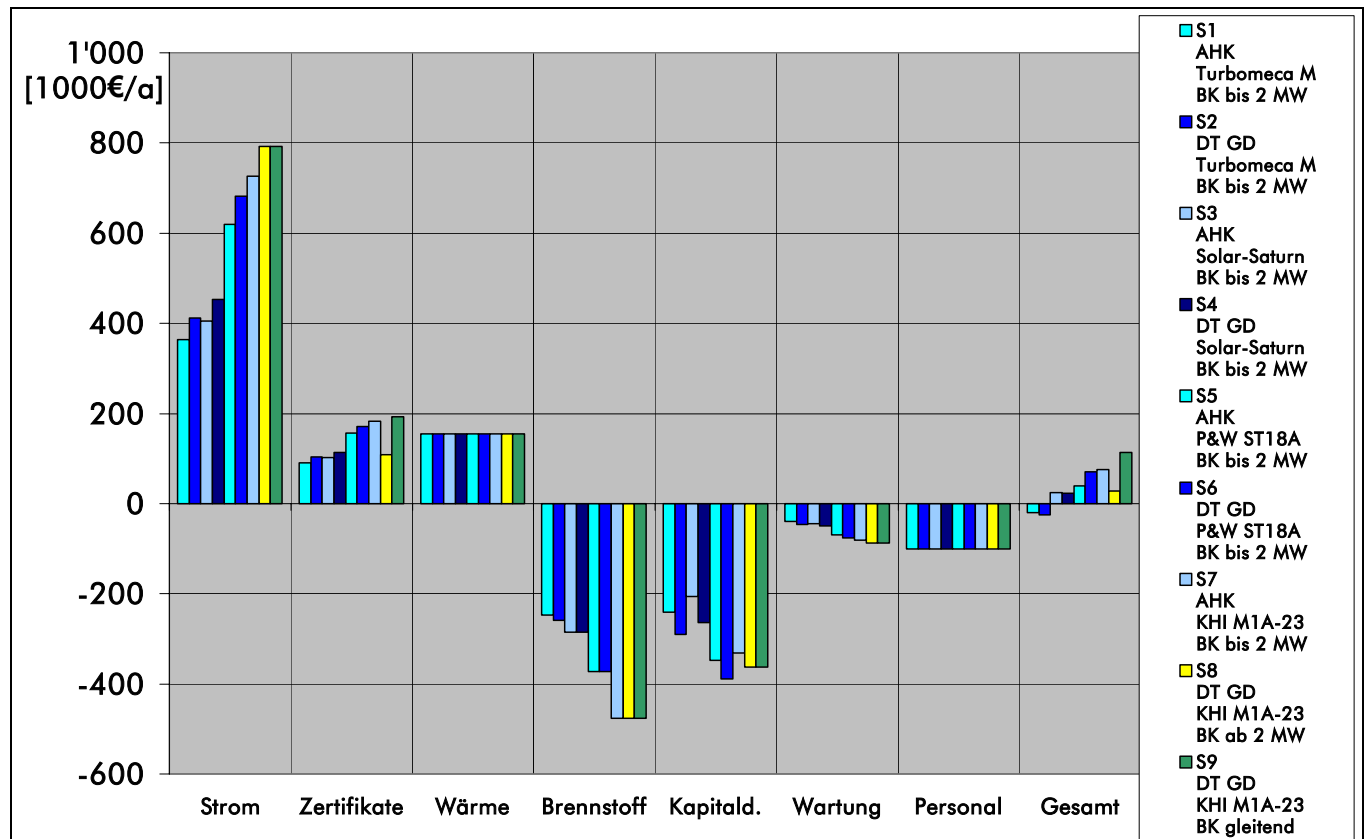


Bild 4.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit der kleinen KWK-Anlagen.
Gleiche Daten wie in Bild 4.1, Basisdaten s. 4.1

Die großen Leistungsunterschiede der verschiedenen Varianten spiegeln sich noch einmal in den Stromerlösen wieder.

Die Kapitalkosten liegen etwa in der gleichen Höhe wie die Brennstoffkosten, bei der kleinen Gasturbine S1/S2 etwas höher, bei den größeren etwas niedriger.

4.2.5.1 Wirtschaftlichkeit für effiziente Schaltungen zu niedrig

Trotz des hohen Strompreises von 90.00 €/MWh läßt sich für die einzigen Schaltungen mit ausreichendem KWK-Wirkungsgrad S1 und S2 keine Wirtschaftlichkeit erzielen.

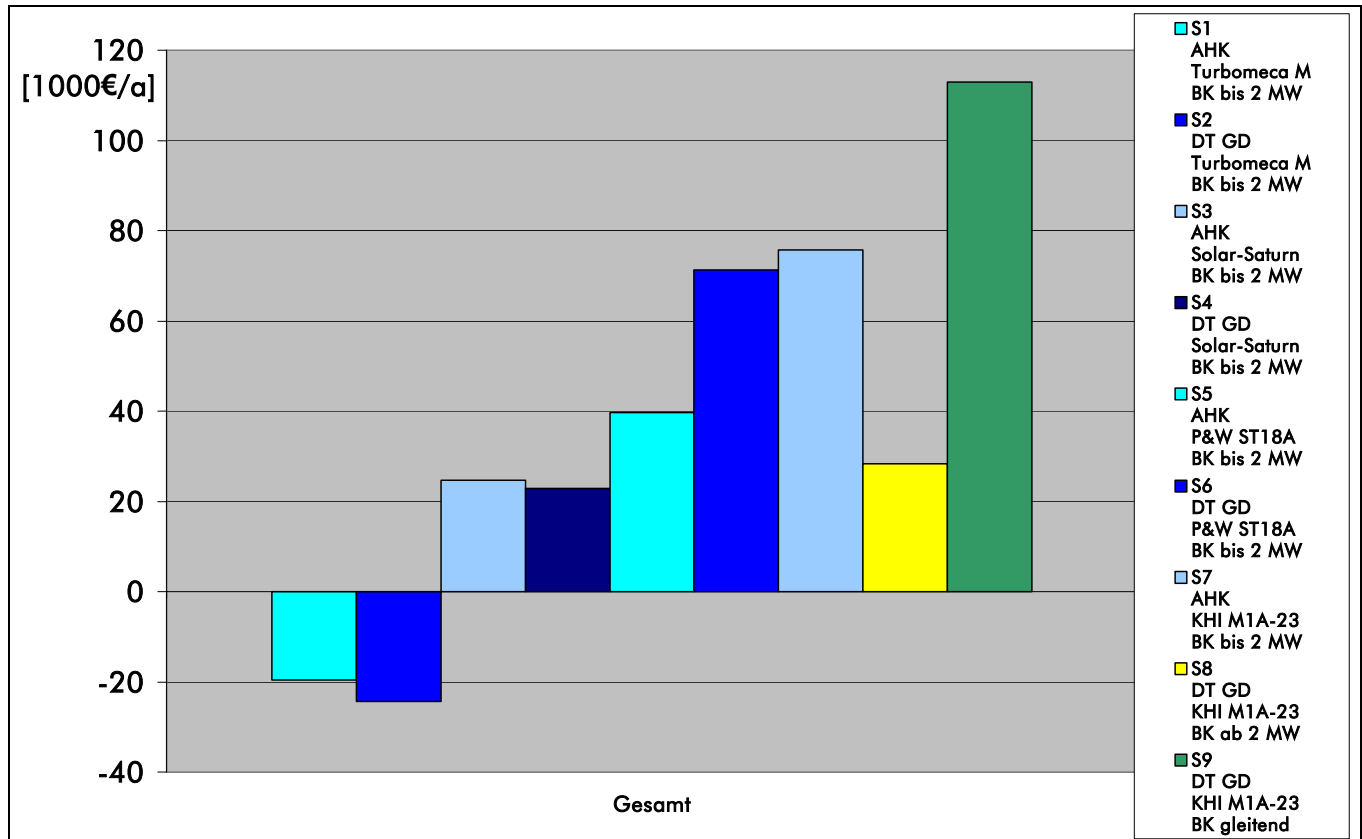


Bild 4.4 Zusammenfassung Bild 4.3: Wirtschaftliches Gesamtergebnis der kleinen KWK-Anlagen

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)

4.2.5.2 Gleitender Übergang zwischen Bonusklassen erforderlich

Wie schon erwähnt, liegt die Variante S7 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 Leistungsklasse 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.

5 Vorschläge für weiteres Vorgehen

Um diese Vorteile zu nutzen und gleichzeitig zu vermeiden, daß bei sehr großen Anlagen extrem hohe Gewinne durch die Zertifizierung von KWK Strom entstehen, wird folgendes vorgeschlagen:

5.1 Gesetzesentwurf

Für den nachfolgendend Gesetzestext wurde ein Vorschlag von Dorenberg² ergänzt und modifiziert:

- (1) Als in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Elektrizität im Sinne dieses Gesetzes gilt die Elektrizitätserzeugung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, deren KWK-Wirkungsgrad im jeweiligen Kalendermonat mindestens 60 % erreicht.
- (2) Der KWK-Wirkungsgrad ist das Verhältnis der erzeugten elektrischen Energie zur für die Elektrizitätserzeugung zusätzlich eingesetzten Brennstoffmenge.
- (3) Die zusätzlich eingesetzte Brennstoffmenge ist die Differenz zwischen der gesamten eingesetzten Brennstoffmenge und der für die Erzeugung der Nutzwärme in einem Heizkessel erforderlichen Brennstoffmenge.
- (4) Für die Ermittlung dieser Brennstoffmenge wird ein Verhältnis von erzeugter Nutzwärme zu eingesetzter Brennstoffmenge von 91 % zugrundegelegt.
- (5) Mechanische Arbeit wird der elektrischen Arbeit in den Sätzen (1) und (2) gleichgesetzt.
- (6) Alternativ zu (1) bis (4) gilt wahlweise als in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Elektrizität im Sinne dieses Gesetzes die Netto-Elektrizitätserzeugung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen als Produkt aus Nutzwärmeerzeugung und der Nennstromkennzahl. Die Nenn-Stromkennzahl wird bezogen auf diejenige Strommenge ermittelt, die einer vollständigen Nutzung der Wärme aus dem Kraft-Wärme-Kopplungsprozeß zuzurechnen ist (Gegendruckscheibe). Gleichzeitig muß bei Neuanlagen der für die Kraft-Wärme-Kopplung zusätzlich benötigte Brennstoff entsprechend (1)-(4) mit einer Effizienz von mehr als 60% in Strom oder mechanische Arbeit umgewandelt werden.
- (7) Als in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Elektrizität im Sinne dieses Gesetzes gilt auch die Netto-Stromerzeugung aus Abwärme, die sonst nicht mit vertretbarem Aufwand genutzt werden kann..

Erläuterungen zu den Zahlen:

KWK-Wirkungsgrad mindestens 60 %: spürbarer Abstand zum „Lubmin-Wert“ von 57,5 %

Nutzungsgrad 91 %: künftiger Mindestwert für Heizkessel

Formel zum KWK-Wirkungsgrad:

Elektrizitätserzeugung : (Brennstoffmenge – erzeugte Nutzwärme : 91 x 100)

² Dorenberg, Kristian, Formulierungsvorschlag zur Bestimmung von KWK-Strom auf der Grundlage des KWK-Wirkungsgrades, Tischvorlage VIK-Arbeitskreis „KWK im liberalisierten Markt“ vom 20.06.2000

5.2 Stündliche Abrechnungsintervalle

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 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.

Dies führt zu einer zusätzlichen Wertschätzung für die Betreiber von KWK-Anlagen. Aufgrund des nach wie vorbestehenden partiellen KWK-Betriebes wird diese Art von Spitzenstromerzeugung zudem mit vergleichsweise sehr niedrigen Emissionen erfolgen und kann damit beim Monitoring der Selbstverpflichtung der Industrie kreditiert werden.

Das Zeitintervall ist kompatibel zum börsenorientierten Stromhandel. Zusätzlicher Meßaufwand für industrielle Anlagen ist nicht gegeben. Aufgrund der Automatisierung ist dies auch nicht für die Abrechnung zu erwarten.

5.3 Entwicklung einer Preisgleitklausel

Die wirtschaftlichen Analysen in 3.2.6, 3.4.3 und 4.2.5 haben verdeutlicht, daß mit unterschiedlichen Größen, Jahresbenutzungstunden und Gaspreisen sehr unterschiedliche Stromgestehungskosten verbunden sind.

Um die mit sich verändernden Rahmenbedingungen absehbaren Probleme einer Bonuslösung zu vermeiden, sollte daher eine geeignete Preisgleitklausel entwickelt werden.

Die in 4.2.5.2 vorgeschlagene Gleitklausel zwischen den Bonusklassen kann damit ebenfalls implizit realisiert werden.

5.4 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

6 Anhang

6.1 KWK-Wirkungsgrad

6.1.1 Definition des KWK-Wirkungsgrades

Der KWK-Wirkungsgrad η_{KWK} ist wie jeder andere Kraftwerkswirkungsgrad definiert als das Verhältnis von zusätzlich erzeugtem KWK-Strom und dem dazu erforderlichen, zusätzlichen Brennstoffbedarf für den KWK-Strom:

$$\eta_{\text{KWK}} = \frac{\dot{P}_{\text{el KWK}}}{\dot{B}_{\text{KWK-Strom}}} \quad (6.1)$$

Der KWK-Wirkungsgrad läßt sich daher direkt mit den Wirkungsgraden und spezifischen CO₂-Emissionen anderer Kraftwerke vergleichen. (s.a. www.tolle.de).

6.1.2 Definition KWK-Strom

Strom aus KWK ist Strom, der in Anlagen der KWK mit einem KWK-Wirkungsgrad von mindestens 60 %

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

erzeugt wird. Der Nutzungsgrad des Ersatzkessels η_{EK} wird festgelegt zu:

$$\eta_{\text{EK}} = 91 \%. \quad (\text{künftige BlmSchV})$$

6.1.3 Berechnung des KWK-Wirkungsgrades aus gegebenen Größen

Der KWK-Wirkungsgrad berechnet sich zu:

$$\eta_{\text{KWK}} = \frac{\dot{P}_{\text{el KWK}}}{\dot{B}_{\text{KWK}} - \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{\eta_{\text{EK}}}} \quad (6.2)$$

Dabei sind

\dot{Q}_{Nutz}	die abgegebene Nutzwärme in [kW]
P_{el}	die elektrische Leistung in [kW]
\dot{B}_{KWK}	der Brennstoffbedarf der KWK-Anlage in [kW], bei Gas als angegeben als (unterer) Heizwert H_u
η_{EK}	der Nutzungsgrad des Ersatzkessels

Dies sind dieselben Größen, die auch für die Berechnung des in vielen Fällen unspezifischen Gesamtnutzungsgrades genutzt werden.

6.1.4 Berechnung aus dimensionslosen Kenngrößen

Der KWK-Wirkungsgrad η_{KWK} läßt sich einfach auch aus vorhandenen dimensionslosen Größen ableiten:

Der thermische Wirkungsgrad des Ersatzkessels (EK) bestimmt sich aus Brennstoffbedarf und abgegebenem Nutzwärmestrom zu:

$$\eta_{\text{EK}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{\dot{B}_{\text{EK}}} \quad (6.3)$$

Der Gesamtnutzungsgrad der KWK-Anlage berechnet sich aus abgegebener Nutzwärme und elektrischer Leistung sowie Brennstoffbedarf der KWK-Anlage:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}} + P_{\text{el}}}{\dot{B}_{\text{KWK}}} \quad (6.4)$$

Der elektrische Wirkungsgrad der KWK-Anlage ist das Verhältnis von elektrischer Leistung und Brennstoffleistung.

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{B}_{\text{KWK}}} \quad (6.5)$$

Aus (6.3), (6.4) und (6.5) läßt sich der KWK-Wirkungsgrad ableiten zu:

$$\eta_{\text{KWK}} = \frac{\eta_{\text{el}}}{1 - \frac{\eta_{\text{ges}} - \eta_{\text{el}}}{\eta_{\text{EK}}}} \quad (6.6)$$

6.2 Spezifische und absolute CO₂-Emissionen

Mit dem KWK-Wirkungsgrad kann - wie bei jedem anderen Kraftwerk auch - die spezifische CO₂-Emission der KWK-Stromerzeugung $y_{\text{CO}_2 \text{ KWK}}$ abhängig vom spezifischen CO₂ des Brennstoffes (z.B. $y_{\text{CO}_2 \text{ Erdgas}} = 0.2 \text{ kg/kWh}$) berechnet werden:

$$y_{\text{CO}_2 \text{ KWK}} = \frac{y_{\text{CO}_2 \text{ Brennstoff}}}{\eta_{\text{KWK}}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] \quad (6.7)$$

Mit der elektrischen Leistung $P_{\text{el KWK}}$ und den jährlichen Benutzungsstunden T bestimmen sich die jährlichen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in KWK bestimmen zu:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2 \text{ KWK}} = \dot{P}_{\text{el KWK}} * y_{\text{CO}_2 \text{ KWK}} * T \quad \left[\frac{\text{t}}{\text{a}} \right] \quad (6.8)$$

Diese kann direkt mit der Emission verglichen werden, die sich bei alternativer Stromerzeugung in einem anderen Kraftwerk ergibt:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2 \text{ Kraftwerk}} = \dot{P}_{\text{el KWK}} * y_{\text{CO}_2 \text{ Kraftwerk}} * T \quad \left[\frac{\text{t}}{\text{a}} \right] \quad (6.9)$$

Hieraus läßt sich die Einsparung an Emissionen berechnen zu:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2 \text{ Einsparung}} = \dot{m}_{\text{CO}_2 \text{ Kraftwerk}} - \dot{m}_{\text{CO}_2 \text{ KWK}} \quad \left[\frac{\text{t}}{\text{a}} \right] \quad (6.10)$$

6.2.1 Minderung CO₂-Emissionen in externen Kraftwerken

Kraft-Wärme-Kopplung führt außer beim Brennstoffwechsel zu höheren Emissionen vor Ort. Die Emissionsminderungen erfolgen dagegen in externen Kraftwerken. So wird in den vorangegangenen Berechnungen dieses Gutachtens angenommen, daß ältere Mittellast-Steinkohlekraftwerke mit

$$Y_{\text{CO}_2 \text{ KW Steinkohle}} = 1.00 \text{ kg/kWh}$$

zurückgefahren werden.

Dies erscheint realistisch, da Kernkraftwerke in der Grundlast betrieben werden, regenerative Kraftwerke nach Verfügbarkeit ins Netz einspeisen und gasgefeuerte GuD-Kraftwerke de facto noch nicht im Kraftwerkspark vertreten sind. Das Zurückfahren von älteren Braunkohlekraftwerken würde zu noch höheren Emissionsminderungen führen, diese verbleiben jedoch weitestgehend in der Grundlast. Modernere Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke werden aufgrund der niedrigeren Brennstoff- und Personalkosten davon weniger betroffen sein.

Während des Ausstiegs aus der Kernkraft wird sich diese Wettbewerbssituation zu Kraftwerken mit höheren, spezifischen Emissionen über einen längeren Zeitraum mehr oder weniger erhalten.

Auch für das Monitoring der Emissionsminderungen der Industrie ist es wichtig, ein realitätsnahes Szenario zu wählen: Nur mit nachvollziehbaren Aussagen werden sich die Obligationen aus der Selbstverpflichtung verifizieren lassen.

Frühestens in vielleicht zwei Jahrzehnten ist damit zurechnen, daß ein Mix von hocheffizienten Kraftwerken auf Steinkohle- und Braunkohlebasis aber auch gasgefeuerten GuD-Kraftwerken ersetzt wird. Selbst bei einem schon deutlichen Anteil von gasgefeuerten Kraftwerken wird dabei kaum ein spezifische Emissionswert von

$$Y_{\text{CO}_2 \text{ KW Mix effizient}} = 0.60 \text{ kg/kWh}$$

erreicht werden. Die mittleren spezifischen Emissionen werden eher höher liegen.

Mit dem oben angegebenen Formelsatz (6.1) bis (6.10) und den KWK-Wirkungsgraden aus Bild 3.7 oder Bild 4.2 lassen sich die Einsparungen für jedes andere Referenzszenario leicht berechnen.

Im Rahmen von Emissionsminderungsstrategien müssen natürlich auch verschiedene Lösungen miteinander verglichen werden. Um auch für derartige Fragestellungen eine Antwort zu geben, werden nachfolgend die Emissionsanalysen der in diesem Gutachten vorgestellten KWK-Schaltungen für zwei zusätzliche Referenzszenarien vorgestellt:

6.2.1.1 Referenz-Szenario: hocheffizientes Steinkohlekraftwerk

Zunächst wird der Vergleich zu einem modernen Steinkohlekraftwerke mit einer spezifischen Emission von

$$Y_{CO_2 \text{ KW Kohle effizient}} = 0.77 \text{ kg/kWh}$$

durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen Bild 6.1 und Bild 6.2.

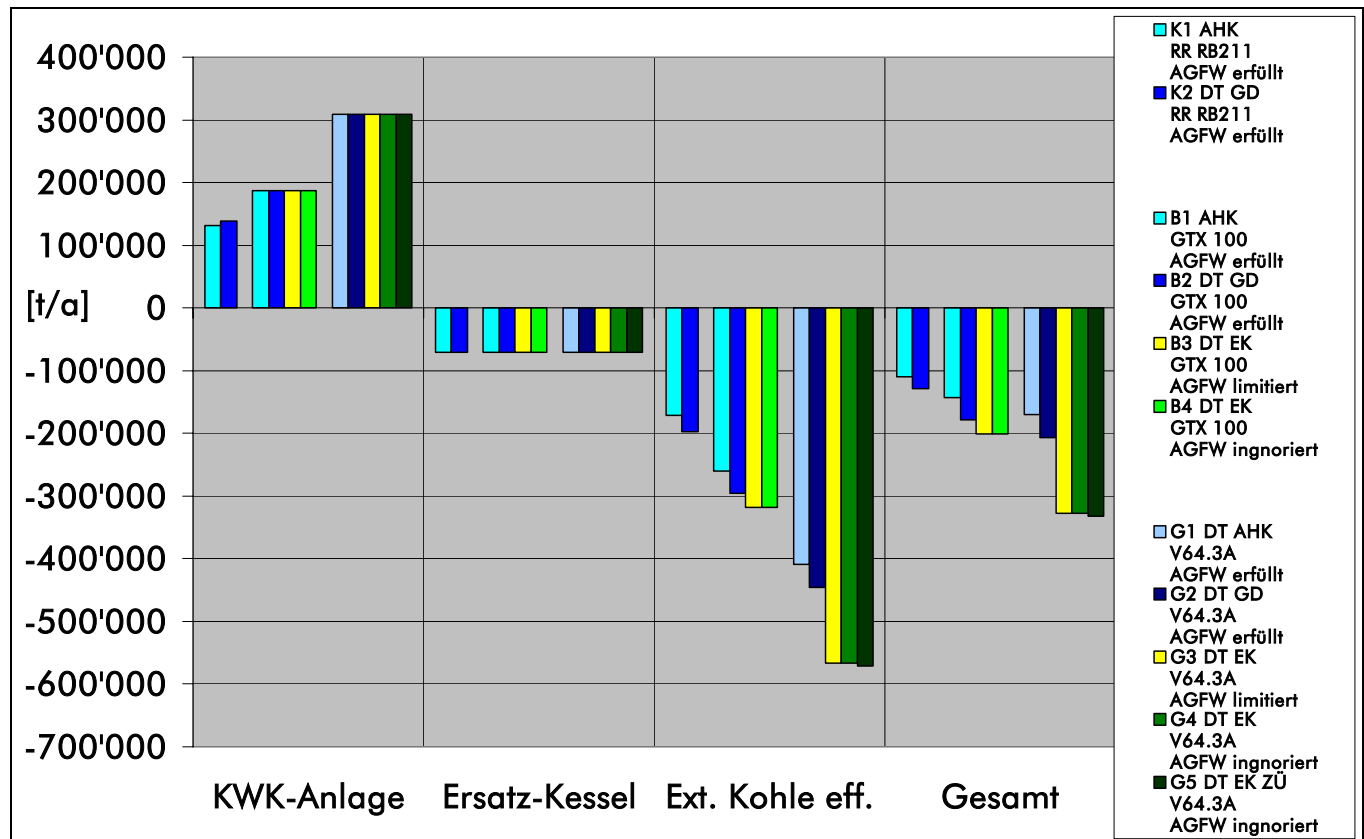


Bild 6.1 Analyse der CO₂-Emissionen bei Versorgung einer Industrieanlage mit 3 Gasturbinen in unterschiedlichen Schaltungen jeweils gleicher Nutz-Wärmebedarf: 39.4 MW, Grundlastbetrieb: 8'100 h/a Spezifische Emissionen externes, hocheffizientes Steinkohlekraftwerk: 0.77 kg/kWh

Die absoluten Gesamtemissionsminderungen gehen in einem solchen Szenario natürlich deutlich zurück, z.B. im Falle der großen, hocheffizienten Gasturbinen-Schaltung G5 von 502'000 t/a auf 332'000 t/a.

Die Grundaussagen und das Ranking der verschiedenen KWK Schaltungen untereinander bleiben jedoch voll erhalten.

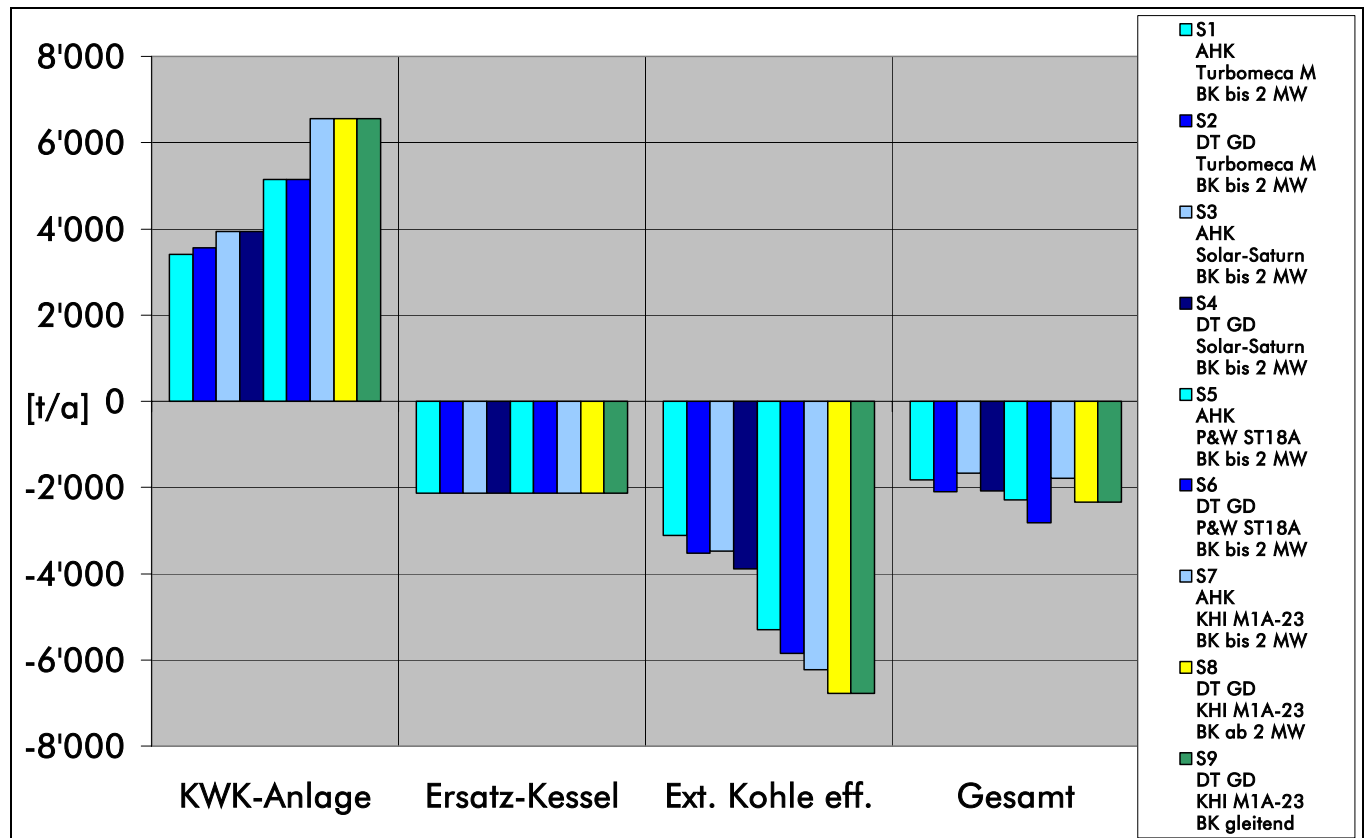


Bild 6.2 CO₂-Emissionen von vier verschiedenen Gasturbinen in KWK, jeweils ohne und mit Gegendruck-Dampfturbine, zur Versorgung eines kleinen Industriebetriebes: gleicher Nutz-Wärmebedarf: 2.4 MW, Benutzungsstunden: 4'000 h/a Spezifische Emissionen externes, hocheffizientes Steinkohlekraftwerk: 0.77 kg/kWh

Bei der Analyse der kleinen KWK-Schaltungen fällt auf, daß das Gesamtniveau der Emissionsminderungen für alle Varianten fast gleicher Höhe liegt.

6.2.1.2 Referenz-Szenario: GuD-Kraftwerk auf Erdgasbasis

Auch die Wettbewerbssituation zu einem neuen gasgefeuerten GuD-Kraftwerk mit einer spezifischen CO₂-Emissionen von

$$Y_{CO_2, KW\ GuD\ Gas} = 0.35\text{ kg/kWh}$$

ist natürlich von Interesse. Durch den Vergleich in Bild 6.3 und Bild 6.4 kann z.B. die Frage beantwortet werden, ob die heute durchgeführten KWK-Investitionen auch noch in einem zukünftigen Kraftwerkspark mit hohem GuD-Anteil sinnvoll sind.

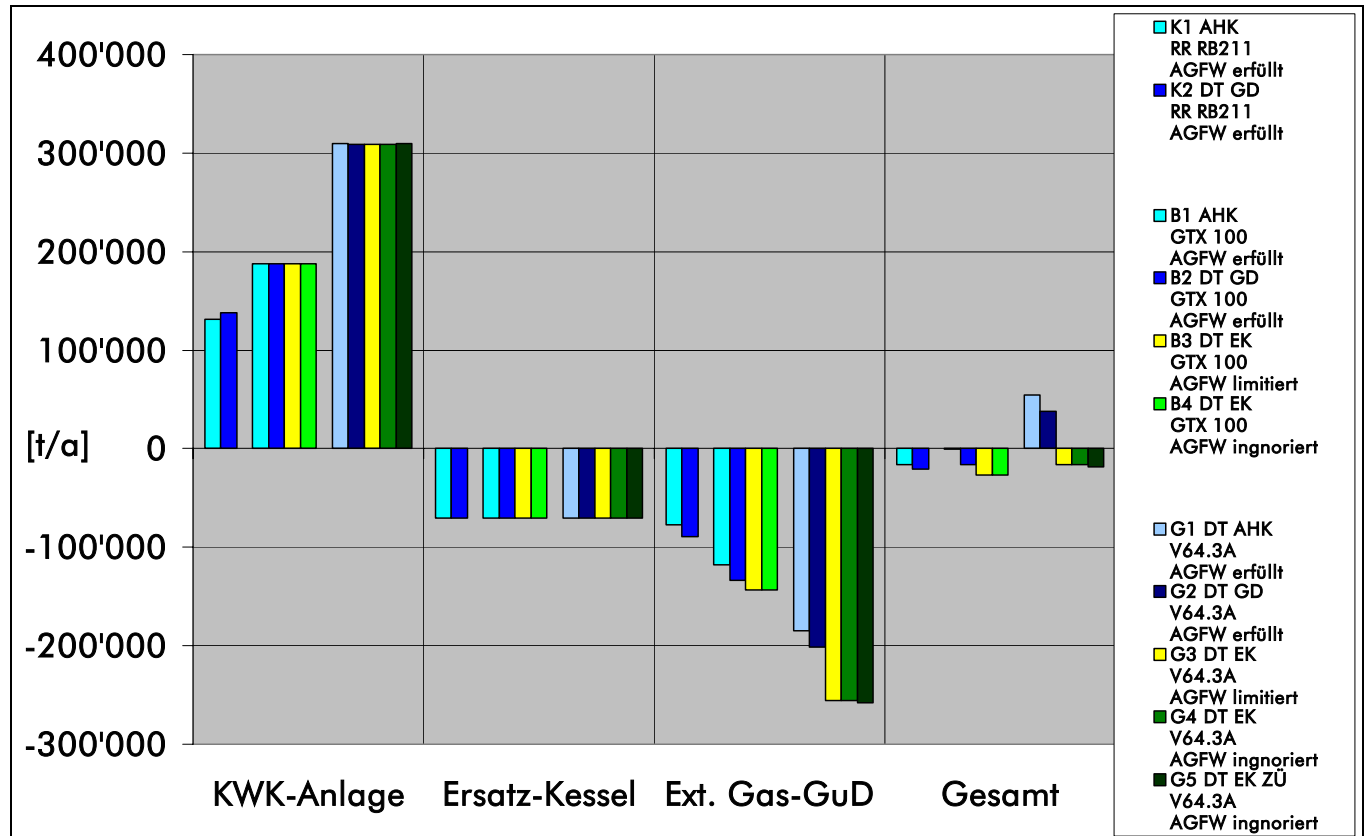


Bild 6.3 Analyse der CO₂-Emissionen bei Versorgung einer Industrieanlage mit 3 Gasturbinen in unterschiedlichen Schaltungen jeweils gleicher Nutz-Wärmebedarf: 39.4 MW, Grundlastbetrieb: 8'100 h/a Spezifische Emissionen externes, gasgefeuertes GuD-Kraftwerk: 0.35 kg/kWh

Es zeigt sich, daß alle Schaltungen, die das Kriterium des KWK-Wirkungsgrades erfüllen, auch in einem solchen Vergleich erwartungsgemäß zu Emissionsminderungen führen.

Weder eine Emissionsminderung noch eine Emissionssteigerung zeigt B1 mit $\eta_{KWK} = 57.6\%$. Sie würde nach dem KWK-Wirkungsgrad auch nicht zertifiziert.

G1 und G2 mit ihren niedrigen KWK-Wirkungsgraden tragen nicht zur Emissionsminderung bei sondern weisen deutliche Mehremissionen auf.

Heute getätigte KWK-Investitionen, die das Kriterium des KWK-Wirkungsgrades erfüllen, sind dagegen auch in einem zukünftigen, hocheffizienten GuD-Kraftwerkspark sinnvoll zu betreiben.

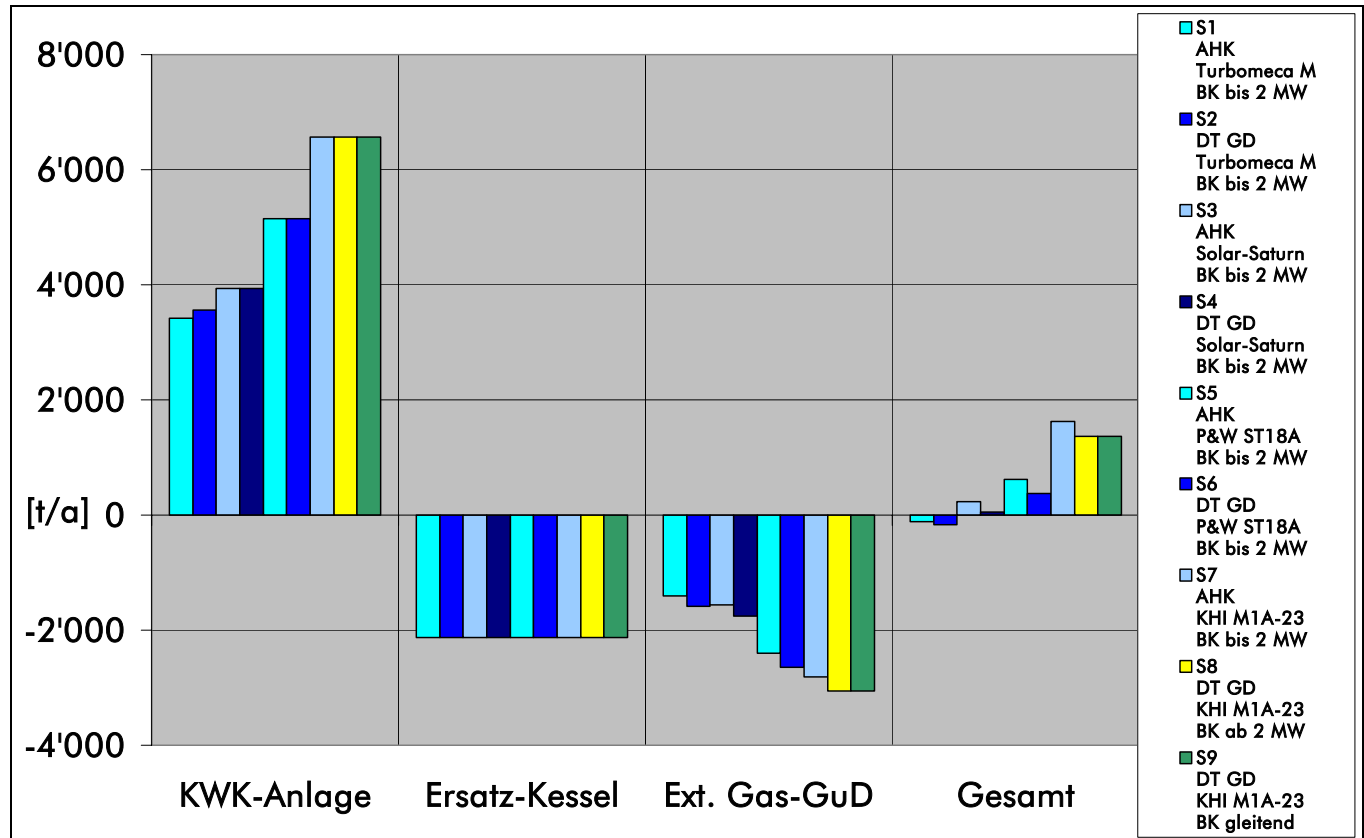


Bild 6.4 CO₂-Emissionen von vier verschiedenen Gasturbinen in KWK, jeweils ohne und mit Gegendruck-Dampfturbine, zur Versorgung eines kleinen Industriebetriebes: gleicher Nutz-Wärmebedarf: 2.4 MW, Benutzungsstunden: 4'000 h/a Spezifische Emissionen externes, gasgefeuertes GuD-Kraftwerk: 0.35 kg/kWh

Bei den kleinen Schaltungen führt in diesem Szenario nur die kleinste Gasturbine S1/S2 zu geringfügigen Emissionsminderung.

Alle anderen Schaltungen weisen einen niedrigeren KWK-Wirkungsgrad auf und führen daher zu deutlichen Mehremissionen. In einem zukünftigen Szenario mit ausreichender GuD-Kapazität sollten derartige Anlagen unter dem Aspekt der Emissionsminimierung außer Betrieb genommen werden.

6.3 Bestimmung der brennstoffbedingten Stromgestehungskosten

Auch die brennstoffbedingten Stromgestehungskosten lassen sich über den KWK-Wirkungsgrad leicht bestimmen.

$$\text{Preis}_{\text{Brennstoffanteil KWK}} = \frac{\text{Preis}_{\text{Brennstoff}}}{\eta_{\text{KWK}}} \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (6.11)$$

Bei einem Gaspreis von z.B. 0,015 €/kWh und einem KWK-Wirkungsgrad von $\eta_{\text{KWK}} = 75 \%$ berechnet sich also der Brennstoffanteil im Strompreis zu 0,020 €.

Durch Addition der spezifischen Wartungskosten, der umgelegten Kapitalkosten und der sonstigen Kosten erhält man den jeweiligen Gesamtpreis.

6.4 Zertifizierung nach AGFW

In den vergangenen Jahrzehnten sind viele KWK-Anlagen als Dampfturbinenkraftwerke gebaut worden. Die Entnahme-/Kondensations-Schaltung ermöglicht dabei je nach Auslegung ein mehr oder weniger großes Gleiten zwischen reinem Kondensations-Betrieb (d. h. ohne KWK) und reinem Gegendruckbetrieb (d. h. 100 % KWK).

Zu Abgrenzung des in Dampfturbinenkraftwerken in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stromes vom reinen Kondensationsstrom sind die AGFW-Kriterien³ entwickelt worden. Sie sind für diesen Zweck geeignet. Dies gilt insbesondere dann, wenn relativ kleine Wärmemengen aus großen Dampfturbinenkraftwerken ausgekoppelt werden.

Auf eine Bewertung des anteiligen Kondensationsteiles im Vergleich zu anderen Kondensationskraftwerken wird dabei allerdings verzichtet.

Die Berechnung der nach AGFW möglichen Zertifizierung des KWK-Stromes erfolgt hier nach einem Vorschlag der AGFW vereinfacht über das Verhältnis Dampfmassenstrom Kondensator zu Dampfmassenstrom gesamt. (s. Tabelle 6.1)

Tabelle 6.1 Daten zur Zertifizierung der KWK-Stroms nach AGFW-Kriterium

Variante	B1	B2	B3	B4
Typ	AHK	DT GD	DT EK	DT EK
Gasturbine	GTX 100	GTX 100	GTX 100	GTX 100
Zertifizierung	AGFW erfüllt	AGFW erfüllt	AGFW limitiert	AGFW ignoriert
Elektrische Netto-Leistung	41.7 MW	47.4 MW	51.0 MW	51.0 MW
Nach AGFW zertifizierte Netto-Leistung	41.7 MW	47.4 MW	38.0 MW	51.0 MW
Dampfmassenstrom Kondensator	0.0 t/h	0.0 t/h	19.7 t/h	19.7 t/h
Dampfmassenstrom gesamt	57.3 t/h	57.3 t/h	77.0 t/h	77.0 t/h

6.4.1 Kontrollrechnung

Zusätzlich wird eine Kontrollrechnung durchgeführt: Der B3 zugrunde liegende GuD-Prozeß wird mit gleichen Frischdampfparametern und Pinch Points im Abhitze-Kessel als reiner Gegendruck-Prozeß gerechnet.

Dies ergibt eine Dampfleistung von 71.8 t/h bzw. eine Wärmeleistung von 49.4 MW. Die dabei erzeugte elektrische Leistung beträgt 47.7 MW. Daraus errechnet sich eine Stromkennzahl von $S = 0.965$. Diese Stromkennzahl multipliziert mit der Wärmeleistung von B3 ergibt eine AGFW-Zertifikatsleistung von 38.0 MW. Sie unterscheidet sich nur um 0.13% von der durch die obengenannte Methode der Dampfmassenstromverhältnisse ermittelten Werte. Das von der AGFW vorgeschlagene Berechnungsverfahren zur Ermittlung der zertifizierten Leistung ist hier also sehr geeignet.

³ AGFW – Regelwerk, Arbeitsblatt FW 308 – Entwurf – , Zertifizierung von KWK-Anlagen, Januar 2001

6.4.2 Besonderheit GuD-Kraftwerk

Eine weitere Besonderheit von in Kraft-Wärme-Kopplung betriebenen GuD-Kraftwerken wird durch das AGFW-Kriterium ebenfalls nicht erfaßt:

Die hocheffizienten Schaltungen B3/B4 und G3-G5 sind als 3-Druckkessel ausgeführt. Der Dampf aus der untersten Druckstufe kann zur Wärmebereitstellung im Industrie-prozeß nicht genutzt werden. Die einzige Möglichkeit, ihn zu nutzen, besteht in der Einspeisung in die Dampfturbine. Die rekuperative Speisewasservorwärmung wird dadurch nicht beeinträchtigt. Wenn diese Dampfauskopplung nicht genutzt wird, geht die entsprechende Energie zwangsläufig über den Kamin verloren. Nur im Kondensations-teil der Dampfturbine kann sie genutzt werden.

Auch der für die Bestimmung der AGFW-Geraden vorgesehene Betriebspunkt ohne Kondensator ist mit diesen Schaltungen natürlich nicht möglich.

6.5 Thermodynamische Effizienz

In den vorangegangenen Kapiteln wurde anhand der Ergebnisse von Vergleichsrech-nungen gezeigt, daß der Tatbestand einer gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme nicht unbedingt einen wirklich effizienten Umgang mit Energie gewährleistet.

Dies wird nachfolgend anhand der Gesetze der Thermodynamik noch einmal technolo-gisch begründet.

6.5.1 Kondensator Abwärme auf Umgebungsniveau

Es gibt keine technischen Kraftprozesse ohne Wärmeabfuhr. Die aus dem Kondensator abgegebene Wärme befindet sich bereits fast auf Umgebungsniveau und besitzt damit keine Arbeitsfähigkeit mehr.

Die Abgasen insbesondere von Gasturbinenprozessen betragen das vierfache von nor-malen Arbeitsprozessen und haben eine wesentlich höhere Temperatur. Sie besitzen damit sogar noch eine hohe Arbeitsfähigkeit.

Bei Dampfturbinenprozessen spielen die Abgasverluste dagegen keine so große Rolle. In der Regel betragen sie weniger als zehn Prozent.

6.5.2 Thermodynamische Verluste auch ohne Wärmeverlust

Dies ist auch der Grund, warum der Prozeß B3/B4 deutlich besser ist als B2 oder gar B1: die thermodynamischen Verlusten bei der Wärmeübertragung im Kessel werden deutlich geringer. Diese Zusammenhänge erschließen sich nur, wenn bei den Betrachtungen auch der sogenannte zweite Hauptsatz der Thermodynamik damit (der Satz von denen nicht im Airbag halten) berücksichtigt wird. Bei der Analyse durch den 1. Haupt-satz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz) bleiben diese Dinge unberücksichtigt.

6.6 KWK-Potentiale

Das KWK-Potential in Deutschland ist sehr groß. Dies wird durch viele Studien und Gutachten belegt. Eine gemeinsame Stellungnahme verschiedener Verbände⁴ weist ein Mehrfaches der heutigen KWK-Leistung aus.

Eine Abschätzung zeigt, daß ohne signifikanten Netzausbau in 20 Jahren die Hälfte des gesamten Stromes in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt werden könnte⁵. So ließen sich allein im Bereich der Stromerzeugung die CO₂-Emissionen um die Hälfte reduzieren.

6.7 Gleichwertigkeit von elektrischer und mechanischer Energie

Elektrische und mechanische Energie sind gleichwertig. Beide sind im thermodynamischen Sinne reine Exergie.

6.7.1 Juristische Präzedenzfälle

Auch auf juristischer Ebene ist bereits vor einigen Jahren die Gleichwertigkeit von mechanischer und elektrischer Energie festgestellt worden:

1992 wurde der bis dahin nur für die KWK auf Basis von Strom- und Wärmeerzeugung §8 Abs. 2 des damals geltenden Mineralölsteuergesetzes zur Steuerbegünstigung von Heizöl auf die Erzeugung von Wärme und Kraft aus den gleichen Gründen der thermodynamischen Gleichwertigkeit ausgedehnt.

Es liegt also auch von daher eine belastbare Präzedenz vor.

⁴ [Grundsatzpapier zur Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland der ARBEITSGRUPPE KWK bestehend aus VKU, VIK, VDMA, BUND, FG-BHKW, e5, IPP's, AGFW, ÖTV, verabschiedete Endfassung vom 01.09.2000](#)
auch unter „Neu/Downloads“ auf www.tolle.de

⁵ [Tolle, Arnold, KWK im Liberalisierten Markt, u.a.: Arbeitspapier zum Vortrag in der Arbeitsgruppe KWK-Ausbauregelung im BMWI am 15.11.2000](#)
unter „Neu/Downloads“ auf www.tolle.de