

*Almut Kirchner
Dr. rer. nat., Marktfeldleiter
Energiepolitik
Prognos AG
CH-4010 Basel*

Dezentrale Produktion von Strom und Wärme mit fossilen und erneuerbaren Energien im Gebäudepark Schweiz

Dezentrale Produktion von Strom und Wärme mit fossilen und erneuerbaren Energien im Gebäudepark Schweiz

In diesem Referat werden die Ergebnisse der aktuellen Energieperspektiven Schweiz des Bundesamts für Energie für dezentrale WKK-Anlagen ausgewertet und zusammengefasst. Aufgrund der Kürze der Zeit werden hier nicht die Energieperspektiven im Ganzen vorgestellt, und eine Reihe von Aussagen muss zunächst eher plakativ bleiben; die quantitative Basis dafür findet sich in den Abschlussberichten der Energieperspektiven. Co-Autor der Arbeit ist Vincent Rits, Prognos AG.

1. Hintergrund und Szenarien

Die Energieperspektiven beinhalten einen Fächer von langfristig orientierten Szenarien für das schweizerische Gesamtenergiesystem bis 2035, der gestützt auf Bottom-up-Modelle für die Energienachfrage und den Kraftwerkspark zur Stromerzeugung quantitative Grundlagen für die energiepolitische Diskussion bereitstellt. Mit der planmässigen Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg bis zum Jahr 2022 stellt sich die Frage der künftigen Strombeschaffung und -erzeugung. In den Arbeiten werden die Optionen „neue Kernkraftwerke“ (A), „neue Gaskraftwerke“ (C), „neue Importe“ (G), „Ersatz der ausgefallenen Kapazitäten und Deckung der zunehmenden Nachfrage durch eine WKK-Strategie“ (D) sowie durch eine „Strategie des verstärkten Zubaus von erneuerbaren Energien“ (E) untersucht.

Die Robustheit oder auch die Reagibilität der Ergebnisse wurde in so genannten Sensitivitätsanalysen auf Veränderungen ausgewählter Parameter der Rahmenbedingungen untersucht.

In diesem Referat werden die Optionen der dezentralen Erzeugung von Strom und Wärme mittels Wärme- Kraft- Kopplung, insbesondere in den Szenarien III und IV, dargestellt. Dafür wird im folgenden ein sehr kurzer Abriss der Szenarien sowie der Kombination mit den Varianten des Elektrizitätsangebots dargestellt, die Grundzüge der betrachteten WKK-Technologien und ihres Einsatzes sowie die Potenziale und ihre Umsetzung in den Szenarien erläutert. Abschliessend werden vorsichtige Interpretationen und Schlussfolgerungen gezogen.

1.1 Überblick über die Szenarien und Varianten

Die vier Grundszenarien werden plakativ kurz wie folgt beschrieben:

Szenario I – „Energiepolitik weiter wie bisher“

Szenario II – „Verstärkte Zusammenarbeit“

Szenario III – „Neue Prioritäten“

Szenario IV – „Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft“

Die Szenarien I und II sind massnahmenorientiert. In Szenario I wird von einer stetigen Weiterentwicklung im Sinne einer Effektivierung bestehender und bekannter Instrumente und der Anpassung an technische Entwicklungen ausgegangen. Es dient als „Baseline“. Zu den bereits bestehenden Instrumenten in Szenario I werden in Szenario II weitere politische Aktionen und Instrumente unterstellt, wie gerichtete Kooperationsanstrengungen zwischen Politik, Energiewirtschaft und weiteren wirtschaftlichen und privaten Akteuren mit dem Ziel der verstärkten Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen und der Förderung erneuerbarer Energien. Beide Szenarien untersuchen die Fragestellung „Was passiert, wenn...“ (hinreichende Bedingung und ihre Folgen).

Die Szenarien III und IV sind zielorientiert und untersuchen die Frage „Was muss geschehen, damit...“ (notwendige Bedingung). Die gestellten Ziele beziehen sich auf Emissions- und (spezifische) Endverbrauchsreduktionen sowie die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien. Um die Ziele erreichen zu können, werden Veränderungen der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen vorausgesetzt. Ein globales Umfeld mit weltweit verstärkten Prioritäten bei Klimaschutz, Energieeffizienz und der Förderung erneuerbarer Energien wird unterstellt. Energieeffizienz und Umweltqualität haben einen deutlich höheren Stellenwert in der Gesellschaft als heute. Hemmnisse bei der Einführung von bestimmten neuen Technologien haben sich verringert.

Da die Szenarien und die damit zusammenhängenden Angebotsvarianten jeweils ihren eigenen Charakter haben (Tabelle 1), ist ein Vergleich der Szenarien immer mit Vorsicht vorzunehmen. Auch die Aussagen, die abgeleitet werden, können nur im Rahmen der unterstellten Annahmen gesehen werden.

Tabelle 1: **Ausgangslagen in den einzelnen Szenarien**

	Szenario I Weiter wie bisher	Szenario II Verstärkte Zusammenarbeit	Szenario III Neue Prioritäten	Szenario IV Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft
Charakteristika				
Art Szenario	Massnahmen-szenario	Massnahmen-szenario	Zielszenario	Zielszenario
Paradigmenwechsel	nein	nein	ja	ja
Ziele				
CO ₂ -Emissionen	Kyoto: -10 % bis 2010 gegenüber 1990		-10 % bis 2020 -20 % bis 2035 gegenüber 2000	-35 % bis 2030 gegenüber 2000
Endenergieverbrauch pro Kopf	-		-20 % bis 2035 gegenüber 2000	-35 % bis 2035 gegenüber 2000
Anteil Neue erneuerbare Elektrizität	+1% (500 GWh) in 2010 gegenüber 2000 *		10 % im Jahre 2035	20 % im Jahre 2035
Anteil erneuerbare Wärme	+3% (3'000 GWh) in 2010 gegenüber 2000 *		20 % im Jahre 2035	30 % im Jahre 2035
Anteil erneuerbare Treibstoffe	-		5 % im Jahre 2035	10 % im Jahre 2035

Tabelle 1: * Ziele EnergieSchweiz, nicht als Bedingung modelliert

Prognos 2007

Aufgrund der unterschiedlichen instrumentellen Voraussetzungen werden nicht alle Optionen für das Elektrizitätsangebot mit allen Szenarien kombiniert. Eine Strategie, keine neuen Grosskraftwerke zuzubauen, sondern nur mehr mit neuen Erneuerbaren Energieträgern oder dezentraler WKK die Differenz zwischen der Stromnachfrage und der inländischen Produktion aus dem abalternden inländischen Kraftwerkspark („Stromlücke“) zu schliessen, erfordert gegenüber dem heutigen energiepolitischen Umfeld deutlich veränderte Ausrichtungen und Instrumente. Auch sind solche Strategien vor allem in Kombination mit Effizienzstrategien sinnvoll. Die Varianten D (fossil-dezentrale Strategie), E (rein erneuerbare Strategie) sowie die Kombination daraus (D&E) werden daher nur für die zielorientierten Szenarien III und IV untersucht (Tabelle 2).

Tabelle 2: **Kombinationen der gerechneten Szenarien und Varianten**

	Var A	Var B	Var C	Var D	Var E	Var C&E	Var D&E	Var G
	Nuklear	Fossil Zentral + Nuklear	Fossil Zentral	Fossil Dezentral	EE	Fossil Zentral + EE	Fossil Dezentral + EE	Importe
Sz I	■	■	■					■
Sz II	■	■	■					■
Sz III	■		■	■	■	■	■	■
Sz IV	■		■	■	■		■	■

Bereits heute wird ein kleiner Anteil des Stroms in der Schweiz mit WKK-Anlagen erzeugt. Diese finden sich vor allem in der Industrie bei Prozessen mit mittlerem und hohem Temperaturniveaux, in der Gastronomie- und Freizeitbranche (Hotels, Wellnessanbieter), in Spitälern sowie bei der Fernwärmeproduktion (Arealversorgung). Auch ohne eine dezidierte Strategie wird davon ausgegangen, dass ein gewisser „autonomer“ Zubau in bestimmten ökonomisch attraktiven Anwendungsfällen erfolgt.

2. Dezentrale Erzeugung von Strom und Wärme

2.1 WKK-Technik

Bei der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) wird ein Grossteil der bei der Stromerzeugung anfallenden Abwärme genutzt – entweder zur Erzeugung von Raumwärme oder für die Bereitstellung von Prozesswärme. Die Brennstoffausnutzung kann gegenüber Techniken der reinen Stromerzeugung, bei denen die Abwärme ungenutzt bleibt, erheblich gesteigert werden. Wärme-Kraft-Kopplung kann mit verschiedenen Stromerzeugungstechniken in einem weiteren Leistungsbereich realisiert werden. Aufgrund der Wärmenutzung eignet sie sich besonders für dezentrale Anwendungen, z.B. zum Einsatz in der Industrie und in Siedlungswärmenetzen. Wenn grosse Wärmeabnehmer (z.B. Fernwärmenetze) vorhanden sind, kann auch Wärme aus Grosskraftwerken ausgekoppelt und entsprechend genutzt werden. In diesem Fall sinkt im Allgemeinen der elektrische Wirkungsgrad der Kraftwerke.

WKK-Anlagen sind in verschiedenen Bereichen einsetzbar. Je nach Bereich und Anwendung unterscheiden sich die Grössen (Leistung) der Anlagen, die Technologie und die

Energieträger. Da diese Faktoren die spezifischen Erzeugungskosten einer Anlage wesentlich bestimmen, sind verschiedene Technologien mit verschiedenen Leistungsklassen im Modell abgebildet, die eine breite Spanne von Anwendungsfällen abdecken. Es werden motorische Blockheizkraftwerke, Gasturbinen, Stirlingmotoren und – in Szenario IV – auch Brennstoffzellen modelliert. Tabelle 3 zeigt die verwendeten typischen technischen Charakteristika der Technologiegruppen.

Genauere Aufschlüsselungen finden sich im entsprechenden Techno-Economic-Assessment (Prognos 2005e), das mit Dr. Eicher+Pauli AG abgestimmt ist.

Tabelle 3: **Technische Charakteristika der WKK-Erzeugungstechnologien,**

Gruppe	Wärmehöchstlast	Thermische Leistung pro WKK-Anlage	Elektrische Leistung pro WKK-Anlage	Stromkennzahl	Volllaststunden
	kW _{th}	kW _{th}	kW _{el}		h/a
BHKW 1	4 bis 75	2 bis 35	1 bis 20	0.50	3'750
BHKW 2	75 bis 445	35 bis 200	20 bis 100	0.55	3'750
BHKW 3/Mikrogasturb.	335 bis 665	150 bis 300	100 bis 200	0.60	4'100
BHKW 4/Mikrogasturb.	665 bis 2'000	300 bis 900	200 bis 600	0.65	4'300
BHKW 5	2'775 bis 5'555	1'250 bis 2'500	1'000 bis 2'000	0.70	4'500
Gasturbine	2'775 bis 5'555	1'250 bis 2'500	1'000 bis 2'000	0.80	3'000
Gasturbine/Kombi-KW	5'555 bis 13'890	2'500 bis 6'250	2'000 bis 5'000	0.80	6'000
Kombikraftwerk	> 13'890	> 6'250	> 5'000	0.80	5'000
Kleines Fernwärmenetz	29'410	10'000	10'000	1.00	5'670 *
Grosses Fernwärmenetz	65'790	25'000	30'000	1.20	5'800 *

Tabelle 2: * Quelle: Prognos, 2001

Prognos 2006

2.2 Auslegungsprinzipien

Bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme ist in den meisten Anwendungsfällen die absetzbare Wärme das begrenzende Kriterium für eine Auslegung der Anlage. Im Folgenden werden die grundsätzlichen Kriterien und Restriktionen für die Auslegung der Anlagen erläutert, die insbesondere für die Anwendung in Wohngebäuden zu beachten sind. Bei der Modellierung von Gesamtsystemen sind notwendigerweise Verallgemeinerungen und Standardisierungen zu treffen; im konkreten Einzelfall werden sich selbstverständlich Abweichungen ergeben.

Für die Auslegung der WKK-Anlagen bildet das zeitliche Profil des Wärmebedarfs die massgebliche Grundlage. Aus den Figuren 1 und 2 lässt sich ablesen, dass ein flacherer Verlauf der Jahresdauerlinie – was gleichbedeutend mit einem ausgeglicheneren Wärmebedarf ist –, zu einem höheren Anteil des Wärmebedarfs, der bei gegebenem Anteil der WKK-Anlage an der Wärmehöchstlast durch die WKK-Anlage gedeckt werden kann, führt. Aus den Jahreganglinien lässt sich ermitteln, dass der Anteil des durch BHKW-Anlagen gedeckten Wärmebedarfs zunimmt, während die Auslastung – gemessen in Volllaststunden – zurückgeht. Dies hat auf den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage negative Auswir-

kungen. Der nicht durch BHKW abgedeckte Jahreswärmebedarf ist durch einen Spitzenkessel zu bedienen (Prognos, 2001).

Figur 1: **Jahresverlauf der Wärmenachfrage in einem exemplarischen Fall**

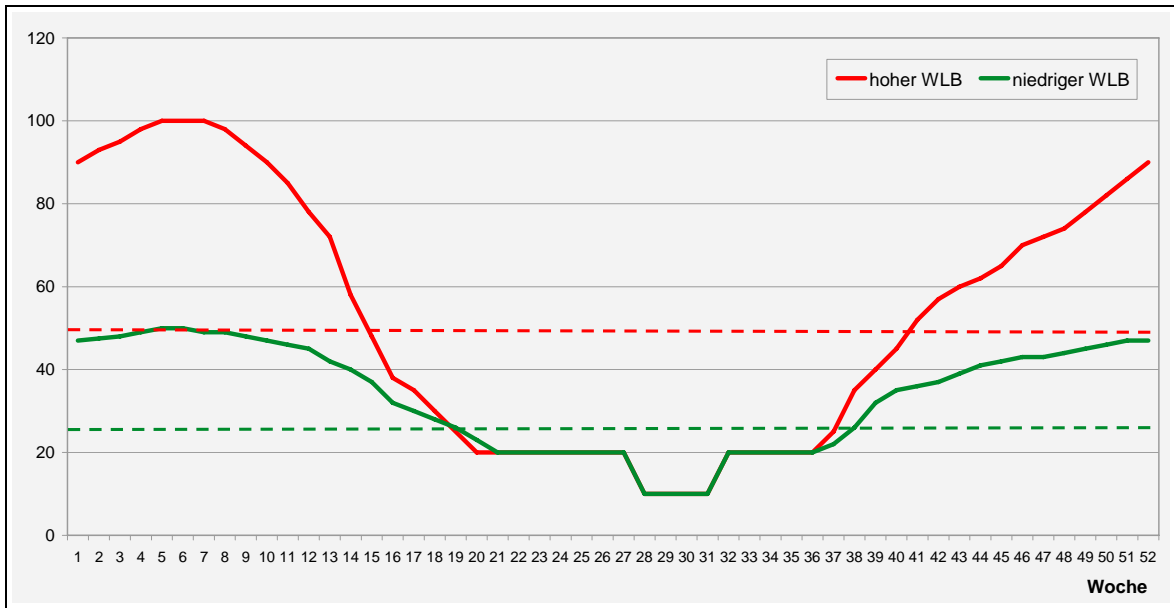


Abbildung 1: WLB = Wärmeleistungsbedarf

Prognos 2006

Aus den jeweiligen gebäudeseitigen Wärmehöchstlasten, den Annahmen zu dem von der WKK-Anlage zu deckenden Anteil und den Vorgaben für die anlagenspezifischen Stromkennziffern lässt sich dann unmittelbar die elektrische Leistung der WKK-Anlage ableiten.

Figur 2: **Geordnete Jahresdauerlinien für den in Figur 1 gezeigten exemplarischen Fall**

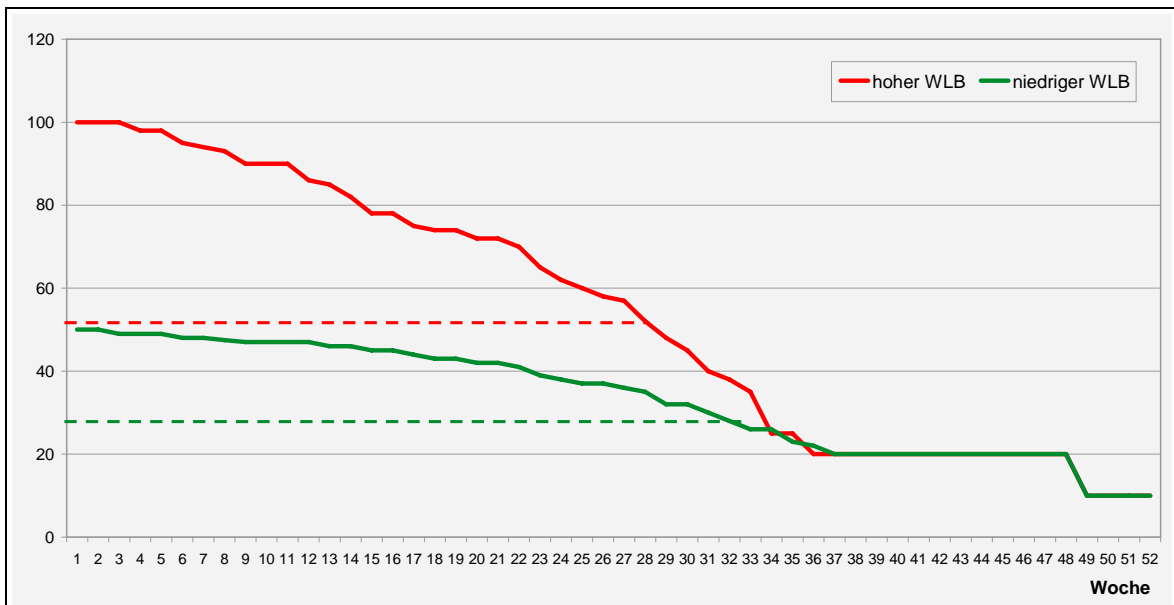


Abbildung 2

Prognos 2006

Grundsätzlich sind die Profile der Wärmenachfrage in den einzelnen Nachfragesektoren und den Grössenklassen recht verschieden; insbesondere bei industriellen Prozessen auf hohen Temperaturniveaux können recht gleichmässige Profile entstehen, die hohe Vollbenutzungsstunden bei hohen Anteilen an der Wärmehöchstlast ermöglichen.

Die hier gezeigten Auslegungskriterien werden auf unterschiedliche Anwendungsfälle angewendet und in den Modellrechnungen werden für diese die Potenziale ermittelt.

3. Potenziale für dezentrale Erzeugung von Strom und Wärme im schweizerischen Energiesystem in den verschiedenen Szenarien und ihre Ausschöpfung

In den Energieperspektiven wird in den Varianten D untersucht, ob die aufgrund der Kraftwerksalterung und der auslaufenden Bezugsrechte entstehende Differenz zwischen Nachfrage und inländischer Erzeugung durch eine dezentrale WKK-Strategie geschlossen werden kann. Als Voraussetzung wird in den entsprechenden Szenarien III und VI bereits eine allgemeine Effizienzstrategie sowohl für Wärme als auch für Strom unterstellt. Damit ergeben sich gegenläufige Entwicklungen zwischen der sinkenden Wärmenachfrage als Potenzialbegrenzung und der steigenden Stromlücke (Figur 3).

Figur 3: Wärmenachfrage vs. Stromdeckungslücke in den Szenarien III und VI

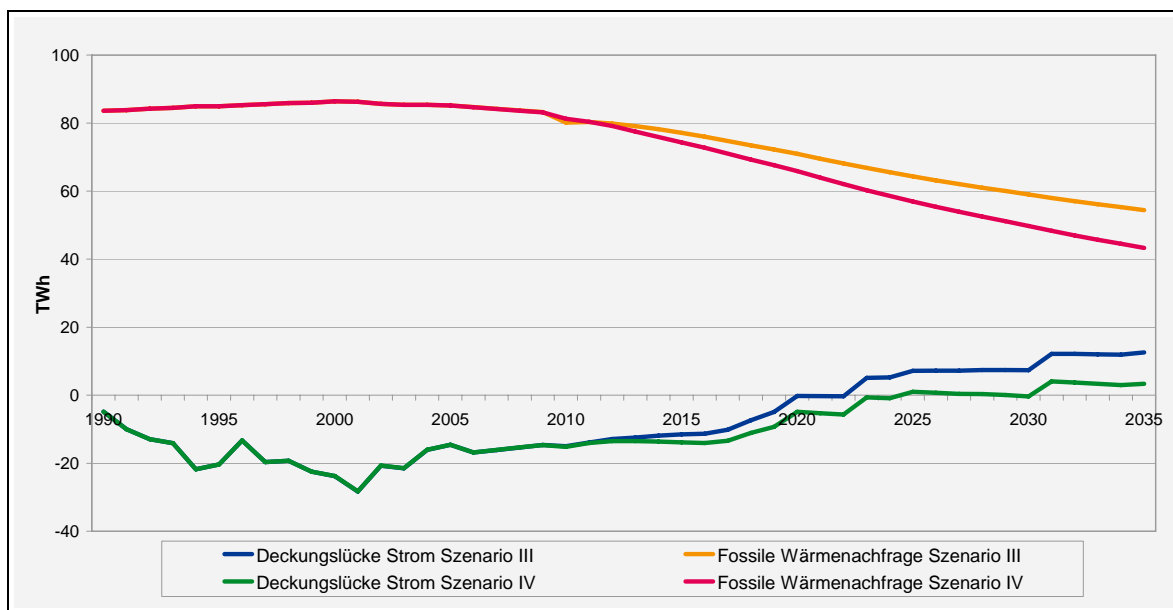


Abbildung 3

Prognos 2006

Zur Ermittlung der Potenziale nach den Grössenklassen der Anlagen wurden verschiedene Informationen unter unterschiedlichen Blickwinkeln miteinander korreliert:

- Im Industriesektor wurden Energieverbräuche nach Prozessen auf verschiedenen Temperaturniveaux in den verschiedenen Branchen mit den Betriebsstättergrössen korreliert.
- Im Gebäudesektor (Dienstleistungen und Haushalte) wurden Anwendungsfälle, Gebäudetypen und die Grössenstatistik der Heizungsanlagen korreliert.

- Bei den Fernwärmenetzen (grosse städtische Fernwärme) wurde vom gegenwärtigen Stand und der Anlagen- und Brennstoffstruktur ausgegangen. Diese wurden mit der Entwicklung (Absenkung) der Wärmenachfrage über die Zeit verknüpft. Es wird zunächst angenommen, dass keine neuen grossen Fernwärmenetze gebaut werden; kleinere Arealversorgungsnetze sind möglich.

Aus den genannten Voraussetzungen ergeben sich aus der in den jeweiligen Szenarien bottom-up ermittelten Wärmenachfrage die maximalen Potenziale für den Einsatz dezentraler gekoppelter Erzeugung. Hierbei wird lediglich derjenige Teil der Wärmenachfrage betrachtet, für den eine fossile Beheizungsstruktur vorgesehen ist. Auf diese Nachfrage werden die o.g. Auslegungskriterien angewendet, um die entsprechende Stromerzeugung zu ermitteln.

Dabei wird beachtet, dass die Potenziale nicht beliebig schnell erschlossen werden können, sondern erst nach und nach im Zeitablauf mit den Investitionszyklen der Wärmeerzeuger.

3.1 Potenziale und Ausschöpfung in Szenario III Variante D

In Szenario III wird von dem entsprechend ermittelten Wärmepotenzial zur Deckung der Stromlücke ein Anteil von ca. 70 % in Anspruch genommen (Tabelle 4, Figur 4).

Tabelle 4: **Technische Potenziale und Ausschöpfungsquoten der WKK-Erzeugungstechnologien, Szenario III**

Gruppe	Elektrische Leistung pro WKK-Anlage	Volllaststunden	Elektrische Leistung nach Wärmehöchstklassen	WKK-Potenzial nach Wärmehöchstklassen (Strom)	Ausschöpfung	Winteranteil
	kW _{el}	h/a	MW _{el}	GWh _{el}	%	%
BHKW 1	1 bis 20	3'750	3'355	12'580	70	75
BHKW 2	20 bis 100	3'750	1'347	5'053	70	75
BHKW 3/Mikrogast.	100 bis 200	4'100	535	2'193	70	75
BHKW 4/Mikrogast.	200 bis 600	4'300	175	751	70	75
BHKW 5	1'000 bis 2'000	4'500	36	162	70	75
Gasturbine	1'000 bis 2'000	3'000	52	157	70	55
Gasturbine/Kombi-KW	2'000 bis 5'000	6'000	73	438	70	55
Kombikraftwerk	> 5'000	5'000	161	804	70	55
Kleines Fernwärmenetz	10'000	5'670 *	90	510	50	75
Grosses Fernwärmenetz	30'000	5'800 *	180	1'044	50	75

Tabelle 3: * Quelle: Prognos, 2001

Prognos 2006

Figur 4: **Technisches Potenzial der fossilen WKK versus Ausschöpfung des Potenzials**

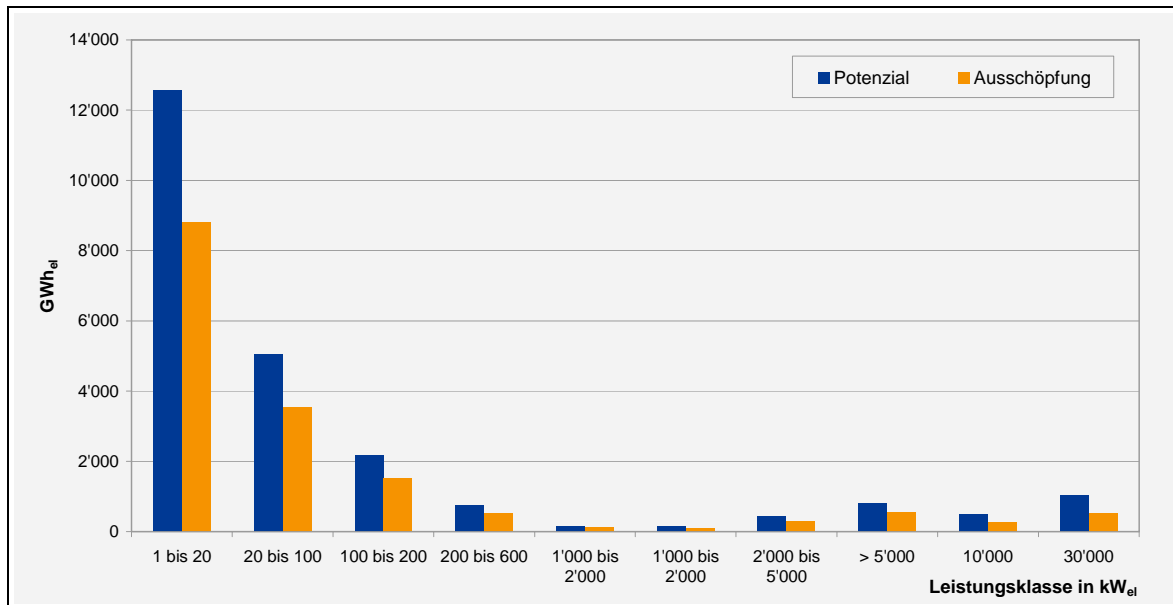


Abbildung 4

Prognos 2006

Es zeigt sich, dass ein hohes Potenzial für die elektrische Erzeugung aufgrund der Gebäude- und Heizungsanlagenstruktur im Bereich der kleinen Anlagen für die Versorgung einzelner Gebäude und ggf. Gebäudegruppen liegt. Damit verglichen sind die kumulierten Potenziale der grossen Leistungsklassen gering. Die Stromlücke von 13.5 TWh in Szenario III führt dazu, dass das Potenzial der Kleinanlagen stark ausgeschöpft werden muss. Dies wiederum bedeutet eine sehr grosse Anzahl von Einzelanlagen bei vielen Einzelaktoren.

In Tabelle 4 lässt sich auch ablesen, dass der Winteranteil bei denjenigen Anlagenklassen, die vor allem zur Raumwärmeerzeugung verwendet werden (Kleinanlagen und die Anlagen zur Fernwärmeerzeugung), mit 75 % hoch ist. Diese zeitliche Aufteilung verläuft parallel zur zeitlichen Struktur der Stromlücke, die aufgrund der geringeren Leistung der Laufwasserkraftwerke und des veränderten Nachfrageprofils (Heizungen, Wärmepumpen, Beleuchtung) ebenfalls im Winter (mit 11.3 TWh) deutlich höher ist als im Sommer.

3.2 Potenziale und Ausschöpfung in Szenario IV Variante D

Gegenüber Szenario III reduziert sich die Wärmenachfrage. Auch die Stromnachfrage ist geringer als in Szenario III. Hierdurch verändert sich die Auslegung der WKK-Anlagen im Vergleich zu den derzeitig installierten WKK-Anlagen und denen von Szenario III in Bezug auf Wärmehöchstlast, Stromkennziffer und Vollbenutzungsstunden.

Ein geringerer (und aufgrund der Gebäudekonstruktion und Wärmedämmung somit) ausgeglichenerer Wärmebedarf bedeutet einen flacheren Verlauf der Jahresdauerlinie. Dies führt zu einem höheren Anteil des Wärmebedarfs, der bei gegebenem Anteil der WKK-Anlage an der Wärmehöchstlast ganzjährig durch die WKK-Anlage gedeckt werden kann (siehe auch Figur 1 und 2).

Aus den jeweiligen gebäudeseitigen Wärmehöchstlasten, den Annahmen zu dem von der WKK-Anlage zu deckenden Anteil und den Vorgaben für die anlagenspezifischen Stromkennziffern lässt sich dann unmittelbar die elektrische Leistung der WKK-Anlage ableiten.

Die geringere Wärmenachfrage führt dazu, dass die Anlagen auf eine relativ gesehen höhere Wärmehöchstlast ausgelegt werden können. Diese Höchstlast wird – ausser bei grossen Heizkraftwerken – auf 0.50 geschätzt (siehe Tabelle 5) statt 0.45 in Szenario III. Hierdurch reduziert sich die thermische Leistung eines BHKWs und somit die elektrische Leistung. Die geringere Wärmenachfrage sorgt für eine weitere Verschiebung in Richtung geringerer Leistungen (vgl. Figur 5).

Die technischen Charakteristika der einzelnen Erzeugungstechnologien sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Zum ersten Mal in den Perspektiven wird in Szenario IV eine sichtbare Marktdurchdringung von Brennstoffzellen unterstellt. In den vorherigen Szenarien wurde der Einsatz als vernachlässigbar unterstellt. Obwohl Brennstoffzellen mit hohen Stromwirkungsgraden von einigen Fachpersonen ein grosses Potenzial zugeschrieben wird, wird auch in Szenario IV nicht mit einem systematischen Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur gerechnet. Dies folgte aus einer Kompakt-Delphi-Umfrage mit Experten (Prognos, 2006a). Die Resultate der Umfrage dienen als Einschätzung der Technologieentwicklung für das Szenario IV. In den Szenarien wird als Brennstoff für Brennstoffzellen zunächst Erdgas oder Methanol unterstellt.

Tabelle 5: **Technische Charakteristika der WKK-Erzeugungstechnologien, Szenario IV**

Gruppe	Wärmehöchstlast	WKK-Anteil an Wärmehöchstlast	Thermische Leistung pro WKK-Anlage	Elektrische Leistung pro WKK-Anlage	Stromkennzahl	Volllaststunden
	kW _{th}		kW _{th}	kW _{el}		h/a
BHKW 1	4 bis 70	0.50	2 bis 35	1 bis 20	0.50	3'750
Brennstoffzellen 1	1 bis 20	0.50	0.5 bis 10	1 bis 20	1.75	3'750
BHKW 2	70 bis 400	0.50	35 bis 200	20 bis 100	0.55	3'750
BHKW 3/Mikrogasturbine	300 bis 600	0.50	150 bis 300	100 bis 200	0.60	4'100
Brennstoffzellen 2	100 bis 200	0.50	50 bis 100	100 bis 200	1.75	4'100
BHKW 4/Mikrogasturbine	600 bis 1800	0.50	300 bis 900	200 bis 600	0.65	4'300
Brennstoffzellen 3	200 bis 700	0.50	100 bis 350	200 bis 600	1.75	4'300
BHKW 5	2'500 bis 5'000	0.50	1'250 bis 2'500	1'000 bis 2'000	0.70	4'500
Gasturbine	2'500 bis 5'000	0.50	1'250 bis 2'500	1'000 bis 2'000	0.80	3'000
Gasturbine/Kombi-KW	5'000 bis 12'500	0.50	2'500 bis 6'250	2'000 bis 5'000	0.80	6'000
Kombikraftwerk	> 12'500	0.50	> 6'250	> 5'000	0.80	5'000
Kleines Fernwärmenetz	29'410	0.34 *	10'000	10'000	1.00	5'670 *
Grosses Fernwärmenetz	65'790	0.38 *	25'000	30'000	1.20	5'800 *

Tabelle 4: * Quelle: Prognos, 2001

Prognos 2006

Die Ermittlung der Potenziale erfolgt analog zu derjenigen in Szenario III. Wie dort ist eine vollständige Ausschöpfung der technischen Potenziale nicht erforderlich, um die Stromlücke in Szenario IV zu decken. Die Ausschöpfungsquoten der technischen Potenziale wurden aus ökonomischen und geografischen Motiven eingeschränkt.

In der Tabelle 6 und Figur 5 sind die WKK-Potenziale und die Ausschöpfungsquoten für Szenario IV abgebildet.

Tabelle 6: **Technische Potenziale und Ausschöpfungsquoten der WKK-Erzeugungstechnologien, Szenario IV**

Gruppe	Elektrische Leistung pro WKK-Anlage	Volllaststunden	Elektrische Leistung nach Wärmehöchstklassen	WKK-Potenzial nach Wärmehöchstklassen (Strom)	Ausschöpfungsquote	Winteranteil
	kW _{el}	h/a	MW _{el}	GWh _{el}	%	%
BHKW 1 + Brennstoffzellen 1	1 bis 20	3'750	2'809	10'534	45	75
BHKW 2	20 bis 100	3'750	1'465	5'493	55	75
BHKW 3/Mikrogasturbine + Brennstoffzellen 2	100 bis 200	4'100	164	604	65	75
BHKW 4/Mikrogasturbine + Brennstoffzellen 3	200 bis 600	4'300	162	660	65	75
BHKW 5	1'000 bis 2'000	4'500	30	131	65	75
Gasturbine	1'000 bis 2'000	3'000	28	125	65	55
Gasturbine/Kombi-KW	2'000 bis 5'000	6'000	69	342	65	55
Kombikraftwerk	> 5'000	5'000	227	804	65	55
Kleines Fernwärmenetz	10'000	5'670 *	90	510	50	75
Grosses Fernwärmenetz	30'000	5'800 *	180	1'044	50	75

Tabelle 5: * Quelle: Prognos, 2001

Prognos 2006

Figur 5: **Technisches Potenzial der fossilen WKK versus Ausschöpfung des Potenzials**

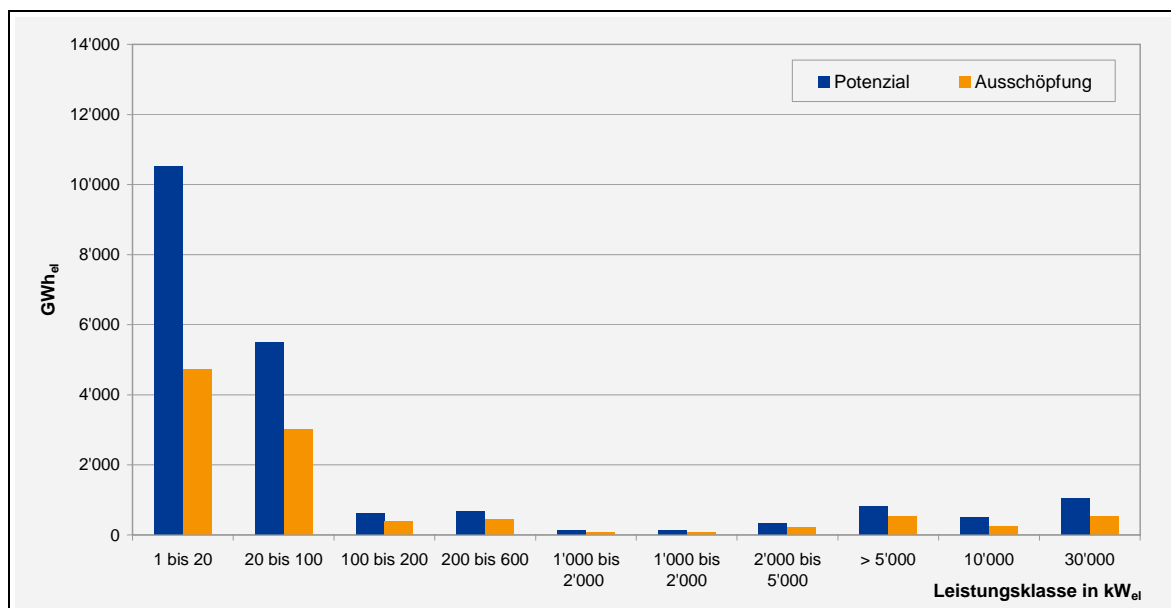


Abbildung 5

Prognos 2006

Im Vergleich zu Szenario III muss ein geringerer Anteil des Potenzials der Kleinanlagen ausgeschöpft werden, um die Stromlücke zu decken. Umgekehrt betrachtet bedeutet dies jedoch immer noch, grob die Hälfte aller Heizanlagen in den Gebäuden bis 2035 durch kleine WKK-Anlagen zu ersetzen.

3.3 Vergleich der jeweils umgesetzten WKK-Potenziale in den verschiedenen Szenarien und Varianten der Energieperspektiven

Je nach unterstellter Szenarienphilosophie und angestrebter Technologieoption für die Elektrizitätserzeugung ergeben sich für die Umsetzung dezentraler Strom- und Wärmeerzeugung sehr unterschiedliche Grössenordnungen.

Die absetzbare Wärme ist – neben Wirtschaftlichkeitsfragen – der wesentlich zu berücksichtigende Faktor beim Einsatz von WKK-Anlagen. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen werden insbesondere kleinere Anlagen auf hohe Volllaststunden hin ausgelegt. Damit ist das begrenzende Kriterium die nachgefragte Wärme-Grundlast.

Zur Ermittlung des technischen Potenzials für die Szenarien wurde der durch fossile Wärmeerzeuger sowie Fernwärme gedeckte Wärmebedarf in den jeweiligen Szenarien herangezogen. Da die Wärmenachfrage in allen Szenarien im Laufe der Zeit zurückgeht, stellt die Wärmenachfrage in 2035 den maximalen Auslegungspunkt für den Einsatz von WKK-Anlagen in den Szenarien dar.

In Szenario I werden keine gegenüber heute veränderten Politikinstrumente unterstellt, somit auch keine für WKK veränderten oder stärker förderlichen Rahmenbedingungen als derzeit. In den vergangenen Jahren liess sich ein Zubau an dezentralen WKK-Anlagen, sowohl im industriellen als auch im Dienstleistungssektor, verzeichnen.

Ein moderater weiterer Zubau in geeigneten Anwendungsfällen wird auch ohne zusätzliche Förderung in Szenario I unterstellt. Dies führt insgesamt zu einer Stromproduktion von 3.3 TWh (inkl. fossiler Anteil von Kehrlichtverbrennungsanlagen) im Jahr 2035 und ist in allen Varianten von Szenario I gleich.

In Szenario II werden ebenfalls keine grundlegend neuen Instrumente und Strategien zur Förderung von WKK-Anlagen unterstellt. Jedoch wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der verstärkten Zusammenarbeit vor allem zwischen Elektrizitätswirtschaft und Wirtschaft die vorhandenen wirtschaftlichen Potenziale stärker ausgeschöpft werden als in Szenario I. In allen Varianten kommt es hier zu einem verstärkten Zubau von bis zu 3.7 TWh in 2035.

In Szenario III wird der WKK-Zubau in den verschiedenen Varianten unterschiedlich behandelt. In den Varianten A, C und G wird, wie in den Szenarien I und II, ein autonomer Zubau angenommen. Aufgrund des in diesem Szenario insgesamt verringerten Wärmebedarfs der Gebäude wird eine Elektrizitätsproduktion aus WKK von bis zu 2.9 TWh in 2035 erreicht. In der Variante D wird untersucht, ob sich die Stromlücke ausschliesslich auf der Basis von dezentraler fossiler WKK-Produktion decken lässt. Es zeigt sich, dass die technischen Potenziale hinreichend sind, um die Stromlücke sowohl im Winter als auch im Sommer zu decken. Sie müssen auch nicht vollständig ausgeschöpft werden, um dieses Ziel zu erreichen. Der Zubau muss allerdings bereits frühzeitig in ausreichendem Masse erfolgen, um die erstmals in 2018 auftretenden „Stufe“ in der Stromlücke kompensieren zu können. In Szenario III wurde zusätzlich zu den „Eckvarianten“ eine Mischvariante „D&E“ gerechnet, die die dezentrale fossile WKK-Erzeugung mit der erneuerbaren Erzeugung kombiniert. Bei dieser Strategie wurden in beiden Erzeugungsbereichen die jeweils kostengünstigsten Potenziale erschlossen, so dass sich der Anteil der WKK-Anlagen in den kleinen Leistungsklassen verringert.

In Szenario IV wurden analog zu Szenario III in den Varianten A, C und G WKK-Anlagen im Rahmen eines autonomen Zubaus eingesetzt. Aufgrund der in Szenario IV weiter gegenüber Szenario III sinkenden spezifischen Wärmebedarfe beträgt die gekoppelte Stromerzeugung in 2035 in diesem Fall 2.4 TWh. In Szenario IV wurden ebenfalls für eine Variante D die aus dem Wärmebedarf abgeleiteten technischen Potenziale ermittelt.

In Figur 6 sind die oben erläuterten und dargestellten erwarteten Potenziale nach Einsatzbereich grafisch nach Szenario und Variante dargestellt. Sichtbar sind die vorhandenen Potenziale im Haushaltsbereich (z.B. Szenario III, Variante D) und der Siedlungs-WKK (Bereich 50 - 500 kW_{el}), die erst bei einer WKK-Strategie ausgeschöpft werden. Die Potenziale im Industriesektor (Anlagen > 1 MW_{el}) sind begrenzt und bereits heute zum Teil ausgeschöpft, so dass es hier keine gravierenden Unterschiede in den Varianten und Szenarien gibt. In der Figur ist der fossile Anteil an der Stromerzeugung (50 Prozent) der Kehrlichtverbrennungsanlagen einbezogen. Erläuterungen zu den erwarteten Potenzialen sind im nächsten Abschnitt wiedergegeben.

Figur 6: Erwartete Potenziale der fossil-thermischen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen in 2035 in GWh_{el}

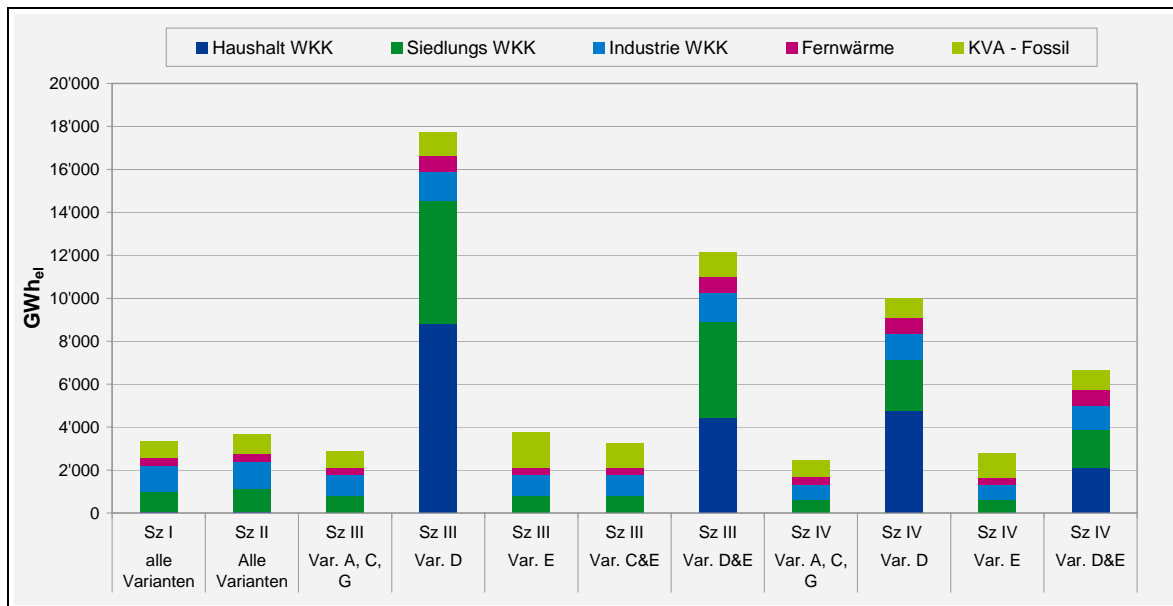


Abbildung 6

Prognos 2006

4. Kosten

4.1 Stromgestehungskosten der einzelnen Technologien

Zu den Perspektivrechnungen gehören neben den technischen Fragen auch Kostenbetrachtungen. Letztere sind ein wichtiges Element für die Abschätzung der Umsetzbarkeit einer Lösung und für die notwendige Eingriffstiefe einer politischen Strategie.

Methodisch werden die Gestehungskosten aus den Investitionskosten (Modulkosten plus Anschlusskosten an die Elektrizitäts- und die Wärmeinfrastruktur), den festen und variablen Betriebskosten sowie den Brennstoffkosten inklusive Wärmegutschriften berechnet. Die Berechnungsmethode verwendet die gleichen gesamtwirtschaftlichen Grundsätze (Abschreibung über Lebensdauer, langfristiger volkswirtschaftlicher Zinssatz) wie bei den konventionellen Kraftwerken. Die Wärmegutschriften beinhalten zumeist die vermiedenen Brennstoffkosten bei konventioneller Wärmeerzeugung, da im Allgemeinen aufgrund der Auslegung auf die Wärmegrundlast auf (konventionelle) Spitzenkessel nicht verzichtet werden kann. In den Investitionskosten sind die Kosten der Wärmeverteilung nicht enthalten, da diese zu den Wärmesystemkosten gehören, die auch bei ungekoppelten Systemen anfallen.

Auf die Stromgestehungskosten wirken zahlreiche verschiedene Einflussgrößen:

- Innerhalb einer Technikklasse (Motoren, Gasturbinen, Brennstoffzellen) sind die spezifischen Investitionskosten (je Leistungseinheit) im Allgemeinen in den kleineren Leistungsklassen (z.T. deutlich) höher als in den grösseren Leistungsklassen. Bei allen

Technologien sind noch Kostenreduktionen erreichbar. Diese sind von der jeweiligen Technologie abhängig und können sich stark unterscheiden. Relativ neue Technologien wie Mikrogasturbinen verzeichnen unter Annahme eines steigenden Absatzes deutlich stärkere Lernkurven als konventionelle Technologien wie Gasmotoren.

- Im Industriesektor können WKK-Anlagen besonders dann attraktiv werden, wenn ganzjährig Wärme abgesetzt werden kann: Dann sind einerseits die Wärmegutschriften aufgrund eines gewissen Leistungsanteils nicht vernachlässigbar, andererseits können (teure) Spitzenlastbezüge aus dem Elektrizitätsnetz reduziert werden.
- In den Einsatzbereichen in der Industrie, in grösseren Dienstleistungsobjekten und bei der Nahwärmeproduktion kann davon ausgegangen werden, dass die niedrigeren Brennstoffpreise für industrielle Anwender zur Anwendung kommen. Bei den kleinen Leistungsklassen, die in Haushalten sowie kleineren Einzelobjekten eingesetzt werden, muss damit gerechnet werden, dass die Gaspreise nach Haushaltstarifen abgerechnet werden. Durch die erhöhten Brennstoffpreise erhöhen sich auch die Stromgestehungskosten. Neben den spezifisch höheren Investitions- und Betriebskosten kommen somit die höheren Brennstoffpreise in den Stromgestehungskosten zum Tragen.
- Es ist zu beachten, dass je nach Anwendungsfall die Gestehungskosten mit unterschiedlichen Systemen und Kostenstrukturen konkurrieren: Wenn die Anlagen im Haushalts- und Dienstleistungssektor prioritär auf Eigennutzung des produzierten Stroms ausgelegt sind und damit der Bezug aus dem Netz zu Endverbraucherpreisen vermieden wird, sind für den Investor höhere Gestehungskosten akzeptabel als im Falle einer Einspeisung ins Netz zu nicht geregelten Tarifen oder bei der Verteilung über ein Binnennetz.
- Insgesamt werden sowohl bei der Ermittlung der Kosten als auch bei der im Kraftwerksmodell unterstellten Auslegung die jeweils höchsten am Markt vorhandenen Wirkungsgrade unterstellt.
- Bei den Brennstoffzellen werden in denjenigen Szenarien und Varianten, in denen sie vorkommen, die bei günstiger Technologieentwicklung erwarteten Zielwerte für die Investitionskosten unterstellt. Es wird unterstellt, dass die Brennstoffzellen vorübergehend mit Erdgas betrieben werden. Zudem werden keine hocheffizienten Brennstoffzellen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von über 70 Prozent angenommen.

Aufgrund der oben genannten Gründe streuen die Stromgestehungskosten der WKK-Anwendungen stark. Die verwendeten Kostenbandbreiten für die wichtigsten Technologie- und Grössenklassen sind in Figur 7 abgebildet.

Figur 7: **Stromgestehungskosten von fossil-thermischer Wärme-Kraft-Kopplung**

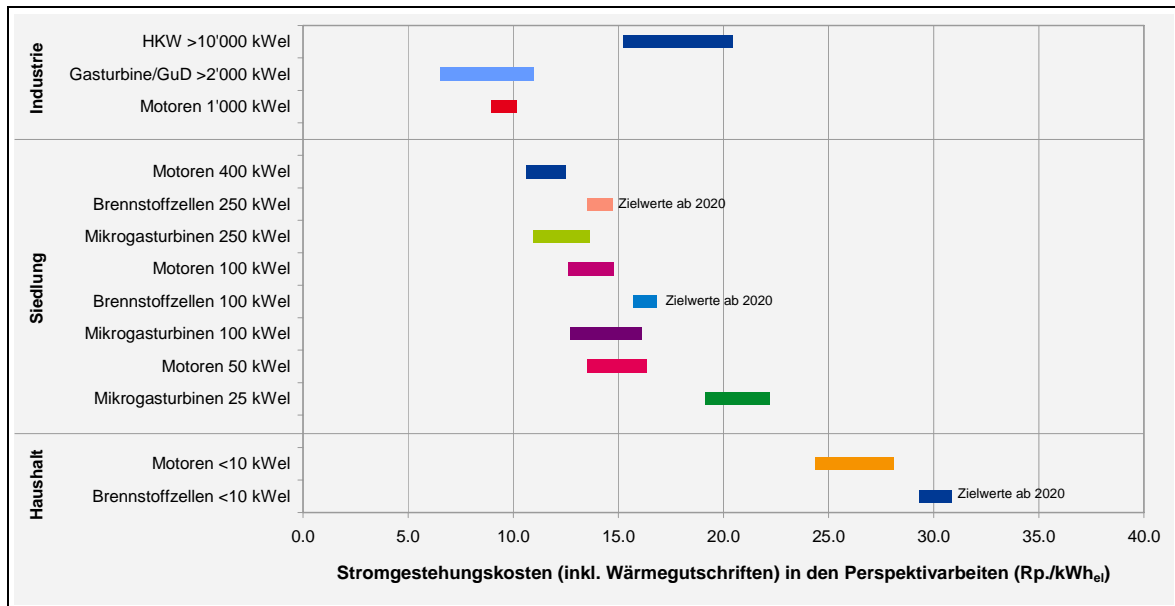


Abbildung 6

Prognos 2006

Allgemeine Anmerkungen: Kosten ab Klemme, Realzinssatz 2.5%, Abschreibung über Lebensdauer, Jahre 2005 bis 2035

Motoren: Betrieben mit Erdgas

Brennstoffzellen: Zielwerte, betrieben mit Erdgas

Mikrogasturbinen: niedrigere elektrische und Gesamtwirkungsgrade als Motoren, deshalb höhere Kosten, obwohl spezifische Investitionskosten zukünftig niedriger sind als diejenigen von Motoren (in der gleichen Leistungsklasse). Erst ab 2010-2015 grössere Marktdurchdringung

Gasturbinen: betrieben mit Mineralöl oder Erdgas, unterschiedliche Zahl der Vollaststunden

4.2 Vergleich der Stromgestehungskosten in den Szenarien und Varianten

Neben den Einzelkosten der Technologien sind die Gesamtkosten des Zubaus wichtige Kenngrössen der einzelnen Optionen. An dieser Stelle werden die durchschnittlichen Gestehungskosten sämtlicher Szenarien und Varianten gezeigt, um eine Einordnung der dezentralen Varianten in den Gesamtkontext der „konkurrierenden“ alternativen zu ermöglichen. Die durchschnittlichen Gestehungskosten sind aus den (diskontierten) Gesamtkosten des Zubaus über alle Technologien ermittelt. Verwendet wird die Methode der direkten gesamtwirtschaftlichen Kosten (im Gegensatz zu einer betriebswirtschaftlichen Methode). Der bestehende Park wird nicht bewertet, ebenso wenig wie die Netze. Die abzuleitenden Aussagen sind insbesondere als Differenzaussagen über die Zubauoptionen interessant. (Tabelle 8)

Tabelle 7: **Diskontierte Gestehungskosten der Lückenschliessung (ohne Netzkosten), in Rp. pro kWh_{el}**

	Var. A	Var. B	Var. C	Var. D	Var. E	Var. C&E	Var. D&E	Var. G	Lücke in 2035 in TWh	
	Nuklear *	Nuklear und fossil-zentral	Fossil-zentral	Fossil-dezentral	Erneuerbare Energien	Fossil-zentral + EE	Fossil-dezentral + EE	Import *	Jahr	
									Wi	
Sz I „Weiter wie bisher“	3.9	4.2	4.4	-	-	-	-	4.4	22.3	16.1
Sz II „Verstärkte Zusammenarbeit“ 330 Mio CHF/a für neue Erneuerbare	4.4	4.7	5.0	-	-	-	-	5.1	18.6	14.1
Sz III „Neue Prioritäten“	4.4	-	5.1 **/***	8.1	7.2	6.1 **	7.9	4.8	13.5	11.3
Sz IV „Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft“	4.3	-	4.7	7.5	7.0	-	7.4	4.8	5.0	6.6

Tabelle 7: Allg.: Exporterlöse sind abgezogen, Zuschlag für CO₂-Kosten (inländische Kraftwerke). Alle Kosten ab Klemme Kraftwerke
* Importe in Varianten A und G ohne zusätzliche Kosten für Netze im Ausland, mit Zuschlag für CO₂-Kosten (ausländische Kraftwerke)
** mit Holzgaszuführung in Erdgaskraftwerken, ausser Chavalon
*** Im Vergleich zu Tabelle 3.4-3 in Band 1 aufgrund der Schlussrevision geringfügig verändert.

Es zeigt sich, dass die Varianten der fossil-dezentralen gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in den Szenarien III und IV jeweils die höchsten durchschnittlichen Stromgestehungskosten mit sich bringen. Dies liegt vor allem an den starken Einsatzquoten der Kleinanlagen. Diese haben einerseits hohe spezifische Kosten pro installierter Leistung, andererseits sind hier als Brennstoffkosten die Haushaltspreise anzunehmen. Gegenüber den zentralen Lösungen (grosse Gaskraftwerke mit grossen konzentrierten Abnahmemengen, für die mindestens Industriepreise, wenn nicht noch geringere Preise, erzielt werden können) erscheint dies als ein Nachteil.

5. CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen der gekoppelten dezentralen Strategien liegen jeweils um ca. 1 Mio t unter den Emissionen der Strategien mit grossen Gaskraftwerken ohne Wärmeauskopplung.

6. Interpretationen und Schlussfolgerungen

Bei einer konsequenten Effizienzstrategie in bezug auf Strom- und Wärmenachfrage ist eine Deckung der „Stromlücke“ auf der Basis gekoppelter dezentraler Strom- und Wärmeerzeuger technisch möglich. Die Rechnungen wurden zunächst mit fossilen Energieträgern durchgeführt; teile der Potenziale können aber auch auf der Basis erneuerbarer Energieträger (gereinigte Biogase, Pflanzenöle, ggf. Holzvergasung im grossen Leistungsbereich) erschlossen werden.

Die gekoppelte Erzeugung hat gegenüber der Stromerzeugung auf der Basis grosser Gaskraftwerke ohne Wärmeauskopplung um ca. 1 Mio. t geringere CO₂-Emissionen. Aufgrund der Wärmegutschriften sind auch jeweils die NO_x- und Feinstaubemissionen geringer.

Die spezifischen Stromgestehungskosten des Zubaus sind aufgrund der kleinen Leistungsgrössen und in den Einzelfällen geringen Brennstoffabnahmemengen spezifisch die höchsten von allen Stromerzeugungsoptionen. Sie liegen um ca. 60 % über denjenigen der zentralen Gaskraftwerkslösungen. Bezogen auf Endabnehmerpreise im Haushaltsbereich (in denen neben den Erzeugungskosten noch Netzkosten, Margen und Steuern / Abgaben enthalten sind), bedeutet dies jedoch nur mehr einen relativen Unterschied in der Grössenordnung von 10-20 %. Eine verstärkte Effizienzstrategie auf der Nachfrageseite verringert die durchschnittlichen Stromgestehungskosten, da weniger von den teuren kleinen Leistungsklassen ausgeschöpft werden muss.

Die Erschliessung der Potenziale im Bereich der kleineren Gebäude erfordert die Aktivierung sehr vieler Akteure und vermutlich politische Instrumente mit hoher Eingriffstiefe.

In den Szenarien III und IV werden ohnehin Instrumente mit hoher Eingriffstiefe vorausgesetzt, wie z.B. eine Energielenkungsabgabe, die u.a. zur Verdoppelung der Endverbraucherpreise führt. In einem solchen Regime kann die Eigenerzeugung und der Eigenverbrauch von WKK-Strom ggf. mit wenigen Korrekturen (z.B. Teilbefreiung der Brennstoffe für WKK-Anlagen von der Lenkungsabgabe) auch im kleinen Leistungsbereich betriebswirtschaftlich dargestellt werden.

Die Modellrechnungen haben gezeigt, dass es sinnvoll sein kann, keine reine fossil-dezentrale Strategie zu verfolgen, sondern sie mit einer erneuerbaren Strategie zu kombinieren (mit Wind, tlw. ungekoppelter Biomasse und Geothermie). Dies wirkt sich sowohl auf die Kosten als auch auf die Emissionen günstig aus.

Quelle und Literatur

Prognos AG (Vincent Rits, Almut Kirchner), Energieperspektiven Schweiz 2035, Band 5 Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebots, Juni 2007, im Auftrag des Bundesamts für Energie

In der dort angegebenen Literatur finden sich zahlreiche technische Einzelheiten und insbesondere weiterführende Anregungen.