



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Grundlagen für eine WKK-Strategie

Bericht des Bundesrates in Erfüllung der Motion 09.3740 der Kommission für Umwelt, Raumplanung und Energie des Nationalrates vom 31. August 2009 „Entwicklung der Wärme-Kraft-Kopplung“

September 2012



Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00 • contact@bfe.admin.ch • www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Die als Prüfungsauftrag überwiesene Motion 09.3740 „Entwicklung der Wärme-Kraft-Kopplung“ beauftragt den Bundesrat, zu prüfen und darüber Bericht zu erstatten, ob ein Gesetzesentwurf vorzulegen ist oder Massnahmen zu treffen sind, damit das Potenzial der Wärme-Kraft-Kopplung besser genutzt werden kann. Mögliche Fördermassnahmen werden im Rahmen der Energiestrategie 2050 entwickelt und vom Bundesrat vorgeschlagen. Der vorliegende Bericht fasst die Grundlagen zusammen.

Unter Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen) versteht man grundsätzlich thermische Anlagen mit gekoppelter, also gleichzeitiger Erzeugung von Wärme und Strom. Die technischen Möglichkeiten sind vielfältig und weisen unterschiedliche Einsatzbereiche und Entwicklungsstadien auf. Zu den WKK-Anlagen gehören u.a. Blockheizkraftwerke, Gasmotoren und Gas- und Dampfturbinen, die sowohl mit fossilen als auch mit biogenen Brennstoffen betrieben werden können. Im Bereich grosser WKK-Anlagen mit einer Leistung von über 1 Megawatt (MW) ist die verfügbare Technologie ausge-reift, während im Bereich kleiner WKK-Anlagen bis zur Erreichung der Marktreife teilweise noch Entwicklungsbedarf besteht (Brennstoffzellen, Stirling-Motoren).

Anhand der Entwicklung der Nachfrage für Raum- und Prozesswärme bis 2050 oder anhand von Grenzkostenkurven kann das technische und wirtschaftliche Potenzial für WKK-Anlagen im Kontext der Förderung erneuerbarer Energien und der Energieeffizienz geschätzt werden. Dieser Bericht fasst drei verschiedene Ansätze (BFE, Eicher+Pauli und PSI) zur Ermittlung der Potenziale zusammen. Die Untersuchungen zeigen, dass das realisierbare Potenzial für die Gewinnung elektrischer Energie bei maximal 10 Terawattstunden (TWh_e) liegt. Beschränkt man sich auf WKK-Anlagen in Industrieanlagen und grösseren Gebäuden, wo keine neuen Fernwärmenetze benötigt werden, liegt das Potenzial bedeutend tiefer.

Die Stromgestehungskosten von WKK-Anlagen sind von mehreren Faktoren abhängig. So spielen sowohl die Grösse der Anlage, die Laufzeiten (Anzahl Jahresbetriebsstunden und Einsatzregime), die Gaspreise, die Strommarktpreise, die Wärmeabsatzpreise und die Kosten des Kohlendioxid (CO₂) Regimes eine entscheidende Rolle. Die meisten WKK-Anlagen können derzeit nicht kostendeckend betrieben werden. Die Stromgestehungskosten liegen bei grösseren Anlagen zwischen 12 und 22 Rp./kWh, bei kleineren betragen sie bis zu 50 Rp./kWh. Damit liegen sie deutlich über dem Marktpreis. Um WKK-Anlagen für Investoren attraktiv zu machen und zusätzliche Potenziale zu erschliessen, sind finanzielle Fördermassnahmen notwendig.

WKK-Anlagen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, emittieren CO₂. Betreiber von solchen Anlagen müssen gemäss CO₂-Gesetz (je nach Anlagengrösse und Einsatzgebiet) entweder die CO₂-Abgabe bezahlen, Emissions-Zielvereinbarungen abschliessen oder am Emissionshandel EHS teilnehmen. Für die anderen Schadstoffe (NO_x und CO) sowie die Feinstaub-Emissionen sind in der Luftreinhalteverordnung Grenzwerte definiert.

Zu den Vorteilen der WKK-Anlagen zählen die hohe Brennstoffausnutzung im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Wärme und Strom, die dezentrale, verbrauchernahe Erzeugung von Strom und Wärme, die bedarfsgerechte Stromproduktion (in Ergänzung der Stromproduktion aus Wasserkraft und Sonnenenergie in den Wintermonaten) sowie die hohe Akzeptanz und kurze Realisierungsdauer.

Zu den Nachteilen gehören die zusätzlichen CO₂-Emissionen, der Bedarf an Wärmeabnehmern (und allenfalls Fernwärmenetzen), die mangelnde Wirtschaftlichkeit kleinerer Anlagen sowie die Konkurrenzierung gewisser erneuerbarer Energien.



Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage.....	1
1.1. Eingereichter Text der Motion 09.3740	1
1.2. Stellungnahme des Bundesrates	1
1.3. Verlauf der Beratungen	1
1.4. Inhalt und Aufbau des Berichts	2
2. Stromproduktion aus WKK in der Schweiz	3
2.1. Was ist eine WKK-Anlage?	3
2.2. Unterscheidung zwischen Klein- und Gross-WKK-Anlagen.....	3
2.3. Stand und Entwicklung der Stromproduktion aus WKK-Anlagen seit 1990.....	4
3. Energie- und klimapolitische Ausgangslage	8
3.1. Gesetzliche Grundlagen	8
3.2. Rahmenbedingungen für WKK unter dem revidierten CO ₂ -Gesetz	8
3.3. Rahmenbedingungen für WKK bezüglich Luftreinhaltung	11
4. Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit	12
4.1. Einsatzmöglichkeiten von WKK-Anlagen	12
4.2. Betriebsarten	12
4.3. Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen	13
4.4. Gestehungskosten in den Energieperspektiven.....	15
5. WKK und Gaskombikraftwerke: Systemvergleiche mit Wärmepumpen	16
5.1. Energieperspektiven.....	16
5.2. Hubacher-Studie.....	17
5.3. Awtec-Studie	17
5.4. Diskussion	18
6. Abschätzung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials	19
6.1. Potenzialbegriffe.....	19
6.2. Ermittlung des Potenzials anhand der Nachfrage nach Raum- und Prozesswärme	19
6.3. Ermittlung des Potenzials anhand einer GIS-Analyse und Hochrechnung.....	21
6.4. Darstellung des Potenzials mittels Grenzkostenkurven	21
6.5. Diskussion	23
7. Vor- und Nachteile fossiler WKK-Anlagen	25
8. Literatur	27



1. Ausgangslage

1.1. Eingereichter Text der Motion 09.3740

Der Bundesrat wird beauftragt, Massnahmen und geeignete Instrumente vorzuschlagen, damit das Potenzial der Wärme-Kraft-Kopplung besser genutzt werden kann.

1.2. Stellungnahme des Bundesrates

In seiner Stellungnahme vom 28. Oktober 2009 wies der Bundesrat darauf hin, dass Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen) trotz ihres hohen Wirkungsgrads der eingesetzten Primärenergie in der Vergangenheit nur wenig genutzt wurden. Dafür wurden mehrere Gründe genannt:

„Die WKK ist eine zwar effiziente, aber fossile Technologie. Zudem ist von hohen Gesamtkosten auszugehen, da das grösste technische Potenzial im Bereich der kleinen und mittleren WKK-Anlagen liegt. Eine weiterführende Studie kommt zum Schluss, dass aufgrund der zahlreichen ökonomischen, technischen und politischen Hemmnisse keine Anwendung zu erkennen ist, die sich in den nächsten Jahren am Markt selbstständig durchsetzen könnte.“

Weitere offene Punkte, wie zum Beispiel eine Potenzialabschätzung sowie eine Analyse der technischen und ökonomischen Auswirkungen auf die Netzinfrastruktur waren zum Zeitpunkt der Stellungnahme des Bundesrates noch im Gange. Auf der Basis der Resultate dieser Studien wollte das Bundesamt für Energie (BFE) alle Argumente gewichten und geeignete Instrumente und Massnahmen für eine WKK-Strategie vorschlagen. Der Bundesrat empfahl deshalb, auf die Auswertung dieser Studien zu warten und beantragte die Ablehnung der Motion. Er kündigte im Weiteren an, dass er bei einer Annahme der Motion durch den Erstrat dem Zweitrat beantragen werde, den Vorstoss in einen Prüfungsauftrag abzuändern.

1.3. Verlauf der Beratungen

Der Nationalrat stimmte der Motion am 16. März 2010 zu. Der Ständerat teilte die Auffassung des Nationalrats, äusserte gegenüber der Motion aber einige Vorbehalte. Da fossil betriebene WKK-Anlagen dem CO₂-Reduktionsziel entgegenwirken, sei eine Förderung dieser Technologie nur gerechtfertigt, wenn ein hoher Wirkungsgrad erreicht werde. Der Ständerat stellte auch fest, dass weitere Abklärungen im Zusammenhang mit einer zunehmenden Verbreitung von WKK-Anlagen nötig seien. Er nahm davon Kenntnis, dass seitens BFE verschiedene offene Fragen zum Zeitpunkt der Beratungen geprüft wurden. Vor diesem Hintergrund beschloss der Ständerat am 30. November 2010 einstimmig, die Motion in einen Prüfungsauftrag abzuändern. Der Text der abgeänderten Motion lautet:

„Der Bundesrat wird beauftragt, zu prüfen und darüber Bericht zu erstatten, ob ein Gesetzesentwurf vorzulegen ist oder Massnahmen zu treffen sind, damit das Potenzial der Wärme-Kraft-Kopplung besser genutzt werden kann.“

Mit seiner Zustimmung überwies der Nationalrat die Motion am 15. März 2011 als Prüfungsauftrag dem Bundesrat.



1.4. Inhalt und Aufbau des Berichts

Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Aspekte der WKK beleuchtet und verschiedene Studienergebnisse in verdichteter Form wiedergegeben. Auf Empfehlungen bezüglich Massnahmen und Instrumente für die bessere Nutzung des Potenzials wird verzichtet. Diese sind Bestandteil der Energiestrategie 2050 und werden im Rahmen der dazugehörigen Vorlage erarbeitet.

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Im Kapitel 2 wird die Stromproduktion aus WKK in der Schweiz beschrieben. Kapitel 3 stellt die energie- und klimapolitische Ausgangslage für die bessere Nutzung des Potenzials der WKK dar. Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten sowie die Wirtschaftlichkeit von WKK gibt Kapitel 4. In Kapitel 5 werden WKK und Gaskombikraftwerke (GuD) verglichen, jeweils im Energiesystem mit Wärmepumpen. Kapitel 6 beschreibt die anhand verschiedener Studien geschätzten Potenziale der WKK. Der Bericht schliesst mit einer Übersicht über die Vor- und Nachteile der WKK.



2. Stromproduktion aus WKK in der Schweiz

2.1. Was ist eine WKK-Anlage?

WKK-Anlagen gehören zu den thermischen Stromerzeugern. Thermische Stromerzeuger sind Anlagen, die aus fossilen oder biogenen Energieträgern elektrischen Strom produzieren. Anlagen, die mindestens 5 Prozent der eingesetzten Energie in Elektrizität umwandeln und einen Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) von mindestens 60 Prozent ausweisen, werden in diesem Bericht als WKK-Anlagen bezeichnet. Im Gegensatz zu konventionellen thermischen Kraftwerken wird die bei der Stromproduktion anfallende Abwärme bei WKK-Anlagen vollständig oder zumindest teilweise genutzt. Die eingesetzten Energieträger werden sowohl in hochwertige Elektrizität als auch in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt. Die Brennstoffausnutzung kann so gegenüber Kraftwerken, bei denen die Abwärme weggekühlt werden muss, erheblich gesteigert werden. WKK-Anlagen können mit verschiedenen Techniken der Stromerzeugung in einem weiten Bereich von Leistungsklassen realisiert werden.

2.2. Unterscheidung zwischen Klein- und Gross-WKK-Anlagen

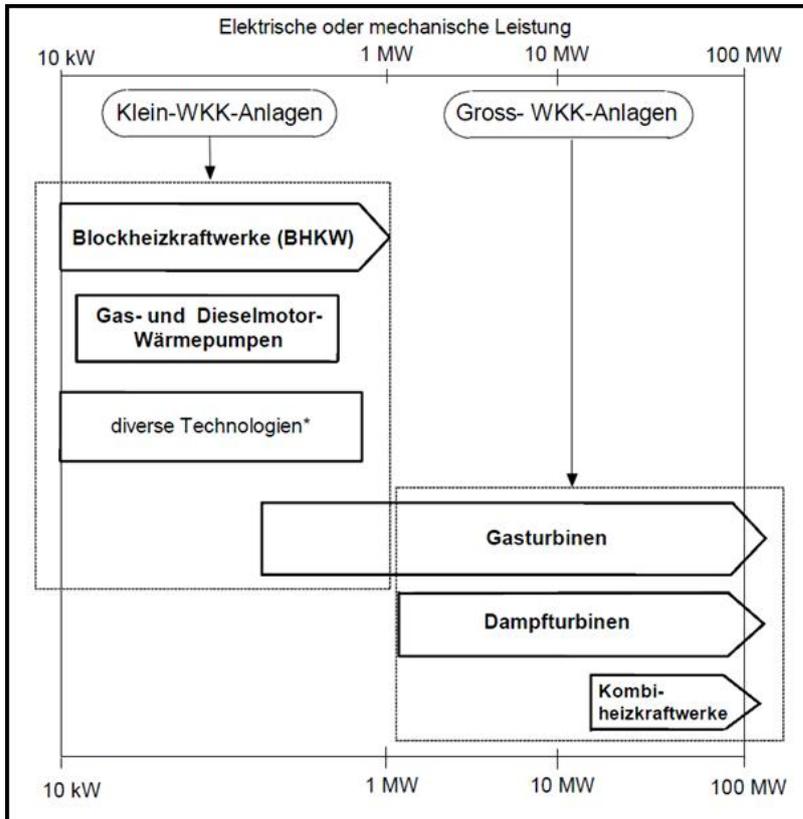
Um vergleichbare Technologien und Einsatzbereiche zusammenfassen zu können, wird zwischen Klein- und Gross-WKK-Anlagen unterschieden. Bei ganz kleinen WKK-Anlagen (unter 50 kW_e) spricht man zudem von Mikro-WKK-Anlagen. Diese gibt es erst seit kurzem auf dem Schweizer Markt.

Klein-WKK-Anlagen umfassen folgende Technologien:

- **Blockheizkraftwerke (BHKW)** mit Gas-, Biogas-, Diesel- und Zündstrahlmotoren. BHKW haben einen elektrischen Wirkungsgrad im Bereich von 28 bis 45 Prozent und einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 100 Prozent.
- **Wärmepumpen**, die mit Gas-, Diesel- und Zündstrahlmotoren angetrieben werden.
- Mit Gasmotoren angetriebene **Gebläse** in Kläranlagen.
- **Total-Energie-Anlagen (TEA)**, die eine Kombination aus Gasmotor, Elektrogenerator und Wärmepumpe darstellen.
- **Gasturbinen unter 1 MW elektrischer Leistung (Mikrogasturbinen)**. Diese haben einen elektrischen Wirkungsgrad im Bereich von 26 bis 31 Prozent.
- **Gänzlich neue Technologien** (Brennstoffzellen, Stirlingmotoren usw.).

Als Gross-WKK-Anlagen werden folgende Technologien bezeichnet:

- **Gasturbinen ab 1 MW elektrischer Leistung**
- **Dampfturbinen:** Es wird zwischen folgenden Dampfturbinen-Typen unterschieden: Entnahme-Gegendruckanlagen, Gegendruckanlagen, Entnahme-Kondensations-Anlagen. Bei reinen Kondensationsanlagen handelt es sich nicht um WKK-Anlagen, da die anfallende Wärme nicht genutzt wird. Einige kleinere Spezialaggregate (Speisepumpen-Antriebsturbinen, Dampfmaschinen, ORC-Turbogeneratoren, Holzgas-Motoren) werden aus erhebungstechnischen Gründen ebenfalls der Gross-WKK-Statistik und bei Auswertungen den Dampfturbinen zugeordnet.
- **Kombiheizkraftwerke (resp. Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke GuD):** Bei Kombiheizkraftwerken wird einer Gasturbine ein Hochdruckabhitzeessel mit Dampfturbine nachgeschaltet. Dadurch kann ein höherer elektrischer Nutzungsgrad erzielt werden.



Figur 1: Aufteilung der WKK-Technologien und -Leistungsbereiche in Klein- und Gross-WKK-Anlagen

2.3. Stand und Entwicklung der Stromproduktion aus WKK-Anlagen seit 1990

Im Jahr 2010 wurden in der Schweiz insgesamt 66'252 GWh Elektrizität erzeugt. Davon stammen 3'538 GWh, also gut 5.3 Prozent, aus thermischer Stromproduktion (ohne Kernkraftwerke).¹

Tabelle 1 bietet einen Überblick über die aktuelle thermische Stromproduktion in der Schweiz (Stand 2010). Die erfassten Anlagen werden in neun Kategorien unterteilt. Bei den Kategorien T1 bis T4 handelt es sich um thermische Stromproduktionsanlagen mit geringer oder fehlender Abwärmenutzung. Die stromproduzierenden WKK-Anlagen sind in den Kategorien W1 bis W4 aufgeteilt. Kategorie W5 umfasst die nicht stromproduzierenden Klein-WKK-Anlagen. Dabei handelt es sich um Wärmepumpen, die mit Gas- oder Dieselmotoren angetrieben werden.

¹ Die Ergebnisse stammen aus einer Umfrage bei allen Anlagenbetreibern grösserer Anlagen sowie den Lieferanten von kleineren Anlagen (BFE 2011d).



Tabelle 1: Übersicht über die thermische Stromproduktion in der Schweiz²

		Nr.	Anlagenkategorie	Anzahl Anlagen Ende 2010	Inst. el. Leist. Ende 2010 [MW _e]	Stromproduktion 2010		
						GWh	%	
Thermische Stromproduktion		T1	diverse therm. Stromerzeuger	20	75.0	14.0	0%	
		T2	Vouvry (stillgelegt 30.9.1999)	0	0.0	0.0	0%	
		T3	Deponiegasverstromung	5	0.6	3.7	0%	
		T4	Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA ohne WKK*)	24	274.6	1'519.6	43%	
		Subtotal Nicht-WKK-Anlagen		49	350.2	1'537.3	43%	
	Wärmekraftkopplung	Gross-WKK	W1	Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA mit WKK*)	6	82.9	329.0	9%
			W2	Industrie**	22	272.5	901.7	25%
			W3	Fernheizkraftwerke und div.**	14	107.0	212.3	6%
		Klein-WKK	W4	stromproduzier. Klein-WKK (Blockheizkraftwerke und Gasturbinen < 1MW)	924	134.7	558.4	16%
			W5	nicht stromprod. Klein-WKK (Gas-/Dieselmotor-Wärmepumpen)	(14)	0.0	0.0	0%
Subtotal WKK-Anlagen (ohne W5)		966	597.1	2'001.5	57%			
Total gesamte thermische Stromproduktion				1'015	947.3	3'538.8	100%	

Kommentare:

- * Definition der Wärmekraftkopplungs(WKK)-Anlagen im Rahmen dieser Statistik: $ETA_{tot} \geq 60\%$ und $ETA_{el} \geq 5\%$
- ** ohne Gas-/Dieselmotoren-Blockheizkraftwerke (diese sind bei den stromprod. Klein-WKK-Anlagen erfasst)

Im Jahr 2010 haben insgesamt 1'015 Anlagen zur thermischen Stromproduktion beigetragen. Davon zählen 966 als WKK-Anlagen. Den grössten Anteil stellt mit 924 Anlagen die Gruppe der Klein-WKK-Anlagen, 42 Anlagen gehören der Kategorie Gross-WKK an. Gesamthaft sind heute 947 MW elektrische Leistung (MW_e) in thermischen Stromerzeugern installiert. Alle WKK-Anlagen zusammen steuern 597 MW_e bei, davon sind rund 77 Prozent in Gross-WKK-Anlagen zu finden. Bei den grossen Anlagen machen vor allem Dampfturbinen den Grossteil aus. Rund 244 MW_e stehen in den Generatoren dieser Kategorie zur Stromproduktion bereit.

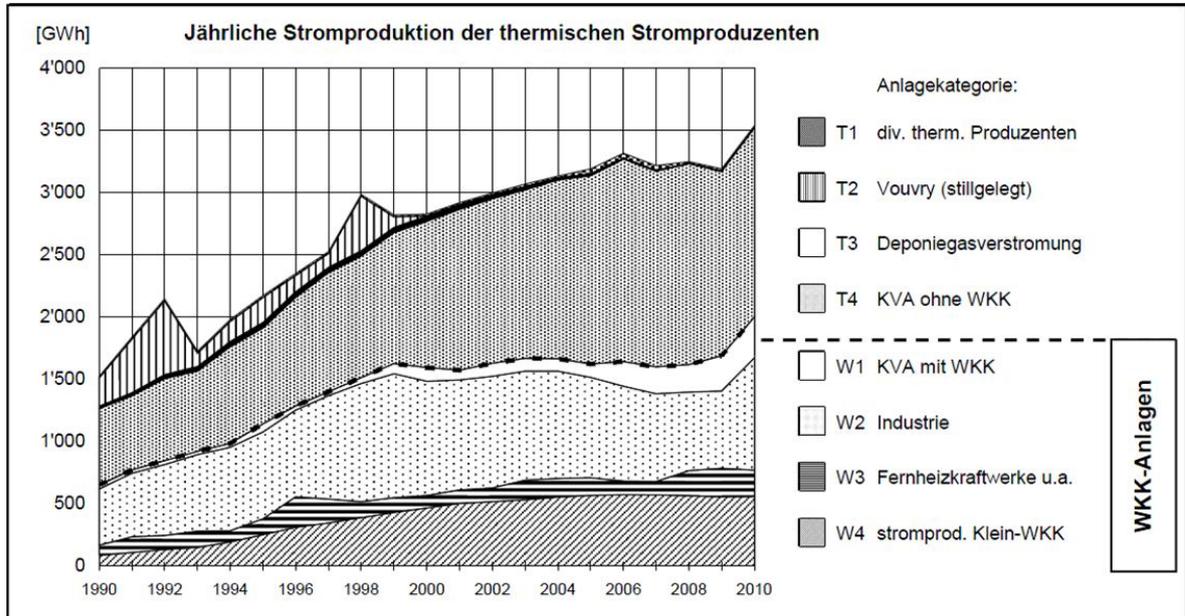
Die gesamte Stromproduktion der thermischen Kraftwerke konnte von 1'524 MWh im Jahr 1990 auf 3'539 MWh im Jahr 2010 gesteigert werden. Zu diesem Ergebnis beigetragen haben vor allem die WKK-Anlagen. Diese haben 2010 gemeinsam 2'002 GWh Strom in die Netze der Betreiber geliefert, die Klein-WKK-Anlagen davon allein 558 GWh.

Seit Beginn der 1990er Jahre wurden netto insgesamt 649 Klein-WKK-Anlagen realisiert. Anfangs der 1990er Jahre erlebten die Kombianlagen einen Boom. In den vergangenen Jahren hat der Ersatz von älteren, kleinen Aggregaten durch grössere, neue Aggregate allerdings stetig zugenommen. Es sind auch ersatzlose Stilllegungen zu verzeichnen. Dies hat dazu geführt, dass der Anlagenbestand in den vergangenen Jahren stagniert oder zuletzt sogar abgenommen hat. Der Produktionszuwachs der vergangenen zehn Jahre wurde fast ausschliesslich in Kehrichtverbrennungsanlagen ohne WKK erzielt.

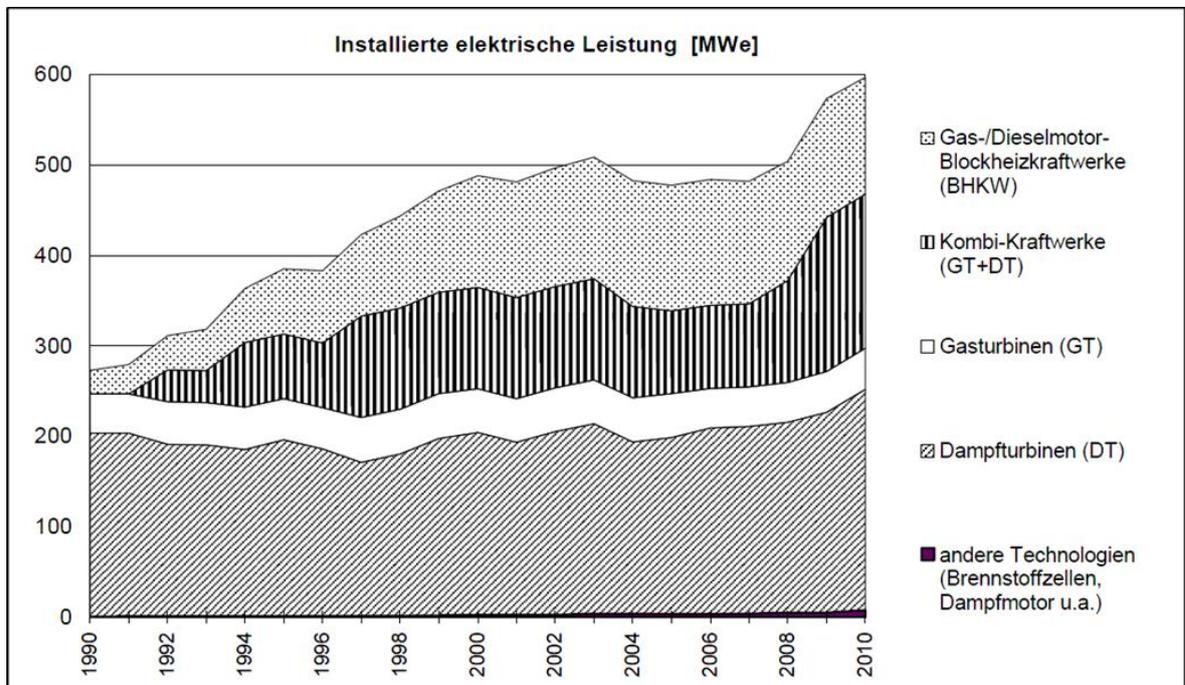
² BFE 2011d.



Ein neues Kombi-Kraftwerk im Wallis führte zu einer beachtlichen Zunahme der WKK-Stromproduktion im Jahre 2010.



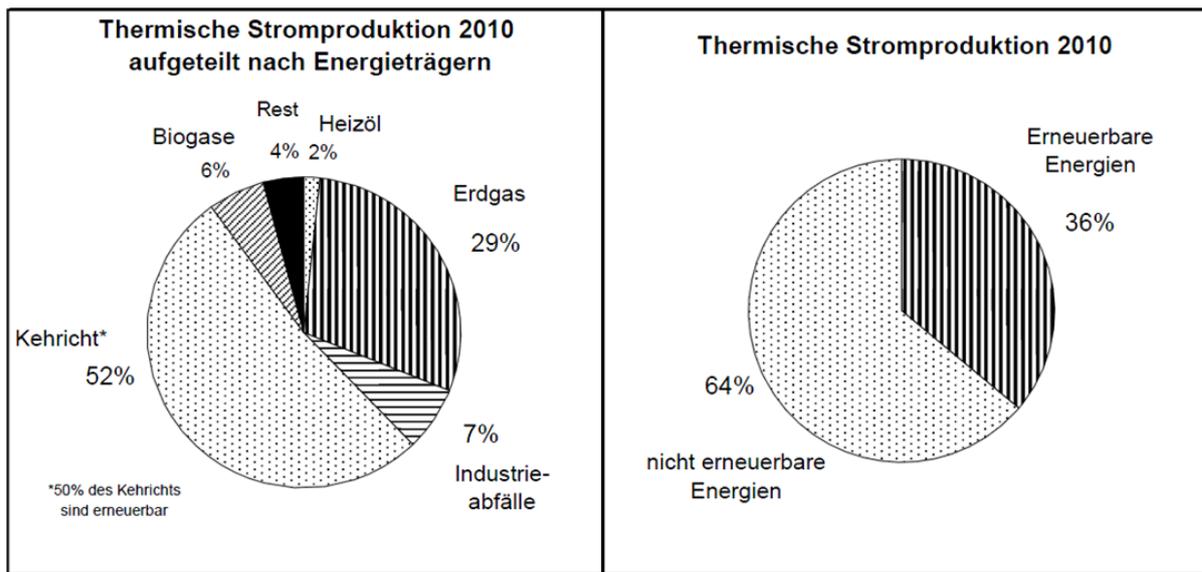
Figur 2: Entwicklung der thermischen Stromproduktion 1990-2010



Figur 3: Entwicklung der elektrischen Leistung der WKK-Anlagen nach Technologien 1990-2010



Die wichtigsten Einsatzgebiete für Gross-WKK-Anlagen waren 2010 die Chemie-, die Papier- sowie die mineralölverarbeitende Industrie. Klein-WKK-Anlagen hingegen wurden vor allem in Kläranlagen (22 Prozent der schweizweit installierten Leistung) und in Gewerbe- und Industriebetrieben (12 Prozent in fossilen BHKW, 7 Prozent in Biogasanlagen) eingesetzt. Bürogebäude (7 Prozent), Wärmeverbundanlagen (11 Prozent), Wohngebäude (8 Prozent) sowie Spitäler und Heime (8 Prozent) waren weitere wichtige Einsatzgebiete von Klein-WKK-Anlagen.



Figur 4: Aufteilung der thermischen Stromproduktion des Jahres 2010 nach Energieträgern

Rund 36 Prozent der zum Betrieb der WKK-Anlagen benötigten Energie stammten 2010 aus regenerativen Energiequellen. Dies sind primär die erneuerbaren Anteile der Abfälle in Kehrichtverbrennungsanlagen und Industriebetrieben sowie etwa 6 Prozent Biogas.



3. Energie- und klimapolitische Ausgangslage

3.1. Gesetzliche Grundlagen

3.1.1. Energiegesetz

Das Energiegesetz vom 26. Juni 1998 (EnG) soll zu einer ausreichenden, breit gefächerten, sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung beitragen. Es schreibt vor, die durchschnittliche Jahreselektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2030 gegenüber dem Jahr 2000 um mindestens 5'400 GWh zu erhöhen. Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte ist bis 2030 auf dem Niveau von 2000 zu stabilisieren (Art. 1). Als Grundsatz gilt, dass jede Energie möglichst sparsam und rationell zu verwenden ist. Dies impliziert unter anderem, dass die eingesetzte Energie und die Abwärme möglichst vollständig genutzt werden soll (Art. 3). Die Netzbetreiber sind verpflichtet, Elektrizität aus fossilen und erneuerbaren Energien in einer geeigneten Form abzunehmen und zu vergüten. Bei der Produktion von Elektrizität aus fossilen Energien gilt die Abnahmepflicht nur, wenn die Elektrizität regelmässig produziert und gleichzeitig die erzeugte Wärme genutzt wird (Art. 7). Im Gebäudebereich sind die Kantone verpflichtet, Vorschriften hinsichtlich des maximal zulässigen Anteils nicht erneuerbarer Energien zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser zu erlassen (Art. 9). Der Bund kann Massnahmen zur Nutzung der Abwärme unterstützen, die insbesondere beim Betrieb von Kraftwerken sowie von Abfallverbrennungs-, Abwasserreinigungs-, Dienstleistungs- und Industrieanlagen anfällt (Art. 13).

3.1.2. Energieverordnung

Die Energieverordnung vom 7. Dezember 1998 (EnV) regelt die Details zum Energiegesetz. Hinsichtlich WKK-Anlagen werden neben Begriffsdefinitionen (Art. 1) auch die Anschlussbedingungen für fossile und erneuerbare Energie geregelt. Regelmässig produzierte Elektrizität unter Nutzung der erzeugten Wärme aus fossilen Energien muss abgenommen werden, wenn der Gesamtnutzungsgrad der gewonnenen Elektrizität und der genutzten Wärme mindestens 80 Prozent beträgt. Ausgenommen von dieser Forderung sind Kehrlichtverbrennungsanlagen (Art. 2a). Im Rahmen der EnV werden auch die Vergütungssätze für die kostendeckende Einspeisevergütung KEV geregelt.

3.1.3. Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKE

Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) erlassen gewisse Vorschriften für den Umgang mit WKK-Anlagen zur Wärmenutzung bei Elektrizitätserzeugungsanlagen (Art. 1.27). So ist die Erstellung von Elektrizitätserzeugungsanlagen mit fossilen Brennstoffen, mit erneuerbaren gasförmigen oder mit erneuerbaren festen oder flüssigen Brennstoffen grundsätzlich nur dann zulässig, wenn die im Betrieb entstehende Wärme fachgerecht und vollständig genutzt wird.

3.1.4. Verordnung über den Nachweis der Produktionsart und der Herkunft von Elektrizität

Die Verordnung des UVEK über den Nachweis der Produktionsart und der Herkunft von Elektrizität vom 24. November 2006 (Herkunftsnachweis-Verordnung, HKNV) legt die Anforderungen an den Nachweis der Produktionsart und der Herkunft von Elektrizität (Herkunftsnachweis) fest. Ein Hinweis auf Elektrizität aus WKK-Anlagen ist dabei nicht gesondert erforderlich.

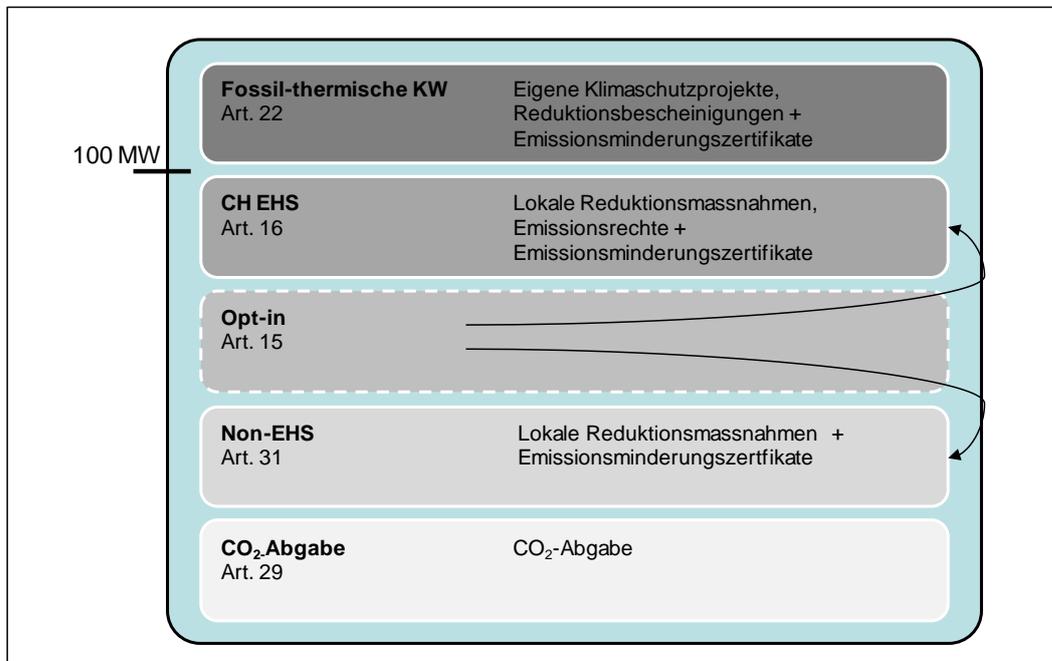
3.2 Rahmenbedingungen für WKK unter dem revidierten CO₂-Gesetz

Das Parlament hat am 23. Dezember 2011 das revidierte Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Gesetz) verabschiedet. Darin sind die klimapolitischen Ziele und Massnahmen bis



2020 verankert. Die Ausgestaltung der Verordnung sowie der Ausführungsbestimmungen ist noch nicht abgeschlossen. Die untenstehenden Aussagen beziehen sich auf den heutigen Wissensstand.

Die Regelungen für WKK bezüglich CO₂-Emissionen sind vom Emissionsvolumen resp. von der Leistung einer Anlage abhängig.



Figur 5: Verschiedene Kompensationsregimes. Die Artikel beziehen sich auf das revidierte CO₂-Gesetz

WKK-Anlagen mit einer Gesamtleistung von **über 100 MW** werden gleich behandelt wie fossil-thermische Kraftwerke, die primär auf die Produktion von Strom ausgelegt sind. Die Emissionen sind zu 100 Prozent zu kompensieren, beispielsweise durch Reduktionsbescheinigungen (inländische Emissionsgutschriften) oder Emissionsminderungszertifikate (ausländische Emissionsgutschriften aus CDM-Projekten). Der Auslandanteil beträgt maximal 50 Prozent. Diese Anlagen sind von der CO₂-Abgabe befreit.

WKK-Anlagen **unter 100 MW** fallen in eines der in Figur 5 dargestellten Regimes:

- Anlagen resp. Standorte ab einer im Rahmen der CO₂-Verordnung zu definierenden Grösse müssen zwingend am Schweizer Emissionshandelssystem (CH-EHS) teilnehmen (Art. 16 revidiertes CO₂-Gesetz). Für den Wärmeteil der Anlage werden kostenlos Emissionsrechte (inländische Emissionsgutschriften, die im CH-Emissionshandelssystem gehandelt werden können) zugeteilt, soweit sie für den treibhausgas-effizienten Betrieb notwendig sind (Benchmark). Je nach tatsächlichem Emissionsaufwand muss die Anlage Emissionsrechte im Emissionshandelssystem erwerben. In beschränktem Umfang können auch Emissionsminderungszertifikate zugekauft werden. Diese Anlagen sind von der CO₂-Abgabe befreit. Der Bundesrat verfolgt die Absicht, das nationale Emissionshandelssystem (CH-EHS) mit dem Emissionshandelssystem der EU (EU-EHS) zu verknüpfen. Entsprechende Verhandlungen mit der EU haben im März 2011 begonnen. Bei einem „Linking“ der Emissionshandelssysteme könnten Emissionsrechte auf dem EU Markt ein- und verkauft werden.
- Anlagen oder Standorte, die aufgrund ihrer jährlichen CO₂-Emissionen bzw. Leistung in die Kategorie „Opt-in“ (siehe Figur 5) fallen, können wählen, ob sie am Emissionshandel teilnehmen möchten (Art. 15 revidiertes CO₂-Gesetz), sich dem Non-EHS Regime (Art. 31 revidiertes CO₂-Gesetz) unterwerfen oder die CO₂-Abgabe bezahlen wollen. Für Anlagen oder Standorte, die freiwillig die

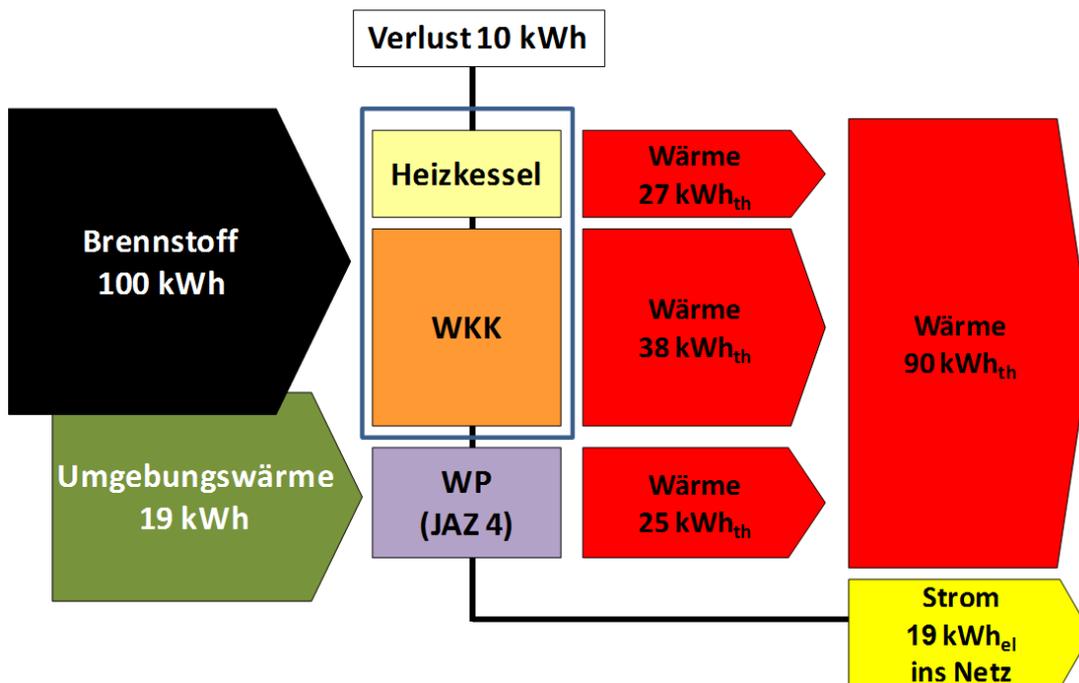


Teilnahme am CH- EHS wählen, gelten dieselben Regelungen wie unter Art. 16. Im Bereich des Non-EHS besteht für Anlagen resp. für Unternehmen bestimmter Wirtschaftszweige die Möglichkeit, sich ebenfalls von der CO₂-Abgabe befreien zu lassen, sofern sie sich gegenüber dem Bund verpflichten, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 in einem bestimmten Umfang zu reduzieren. Wird das Ziel nicht erreicht, können in beschränktem Umfang Emissionsminderungszertifikate zugekauft werden.

- Alle anderen Anlagen sind der CO₂-Abgabe unterstellt (Art. 29 revidiertes CO₂-Gesetz) und können sich nicht befreien lassen. Die Emissionen dieser Anlagen und Standorte werden über die CO₂-Abgabe reguliert. Der Bundesrat hat die Möglichkeit, die Abgabe bis auf 120 CHF pro Tonne CO₂ zu erhöhen, falls die für Brennstoffe festgelegten Zwischenziele nicht erreicht werden.

Exkurs: Lokale CO₂-Neutralität einer Wärmeproduktionsanlage

Zur lokalen Reduktion von CO₂-Emissionen einer Wärmeproduktionsanlage ist es möglich, anstelle eines einfachen Heizkesslersatzes eine WKK-Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe zu installieren. Ein Teil des in der WKK-Anlage produzierten Stroms wird für die Wärmeproduktion durch die Wärmepumpe verwendet, der Rest wird ins Netz eingespeist. Das in Figur 6 dargestellte kombinierte System emittiert im Vergleich zur Referenztechnologie (Heizkessel nach aktuellem Stand der Technik) bei gleich bleibender Wärmeproduktion gleichviel CO₂, produziert jedoch zusätzlichen Strom. Wird der Anteil der Elektrizität, der für den Betrieb der Wärmepumpe verwendet wird, erhöht, können im Vergleich zur Referenz sogar CO₂-Emissionen reduziert werden.³



Figur 6: CO₂-neutrales, bivalentes WKK-System mit Wärmepumpe (mit einer Jahresarbeitszahl⁵ von 4) und einer „neutralen“ CO₂-Bilanz (im Vergleich mit einem Gaskessel) als Ersatz des Heizkessels und mit Strom-Netzeinspeisung

³ BFE / Prognos 2007a.

⁵ Die Jahresarbeitszahl gibt das Verhältnis der über das Jahr abgegebenen Heizenergie zur aufgenommenen elektrischen Energie an und ist somit ein Mass für den über das Jahr gemittelten Wirkungsgrad einer Wärmepumpe. Da die Temperatur der Wärmequelle für die Wärmepumpe über das Jahr variiert, kann die Jahresarbeitszahl nicht wie der Wirkungsgrad in jedem Moment gemessen werden, sondern muss über das Jahr ermittelt werden.



Neben der Kombination einer WKK-Anlage mit einer Wärmepumpe sind auch andere Reduktionsmassnahmen denkbar, z.B. die Verwendung von Biogas anstatt Erdgas usw.

3.3 Rahmenbedingungen für WKK bezüglich Luftreinhaltung

WKK-Anlagen unterstehen der Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 19985 (LRV). Diese verpflichtet die Betreiber zur Einhaltung von Emissionshöchstwerten für mehrere Gase, die bei der Verbrennung entstehen (ausgedrückt in mg/m^3). Die wichtigsten der Verordnung unterstellten Schadstoffe sind Stickoxide (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO). Die Grenzwerte betragen je nach Treibstoff 400 oder 250 mg/m^3 für NO_x sowie 650 mg/m^3 für CO .

Seit den 1980er Jahren sind die NO_x -Emissionen zwar rückläufig. Trotzdem werden die Grenzwerte regelmässig, besonders in Städten und an Strassenrändern, überschritten. Der Ausstoss von gesundheitsschädigendem CO erreichte seinen Höhepunkt Mitte der 1970er Jahre. Inzwischen ist er auf weniger als ein Drittel der damaligen Werte gesunken.

Einzelne Kantone, so z.B. Zürich, fördern die Produktion von Strom und Wärme mit erdgasbetriebenen WKK-Anlagen durch günstige Einspeisevergütungen für Strom. Die Emissionsgrenzwerte liegen in diesen Kantonen deutlich unter jenen der LRV (in Zürich bspw. unter 50 mg/m^3 NO_x -Ausstoss). Emissionsgrenzwerte unter 100 mg/m^3 für CO und NO_x setzen den Einbau von Abgasnachbehandlungssystemen wie Katalysatoren oder Filtern voraus.



4. Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit

4.1. Einsatzmöglichkeiten von WKK-Anlagen

Aufgrund der Wärmenutzung eignen sich WKK-Anlagen vor allem für dezentrale Anwendungen, zum Beispiel für den Einsatz in der Industrie und in Wärmenetzen von Siedlungen. Motorische WKK-Anlagen (Blockheizkraftwerke, BHKW) sind zumeist gasbefeuert.

Mikro-WKK-Anlagen (1-20 kW) eignen sich für Gebäude ohne externe Wärmenetze. Sie werden im Allgemeinen auf die Wärme-Grundlast ausgelegt. Daher ist zusätzlich ein Spitzenkessel für die Wärmeerzeugung nötig. Anlagen von 20-100 kW eignen sich für die Versorgung von grösseren Wohn- und Dienstleistungsobjekten. Höhere Leistungsklassen bis ca. 5 MW kommen für industrielle Anwendungen oder Stadtteile mit grossen Wärmeabnehmern oder Wärmenetzen in Frage. BHKW können neben Treibstoffen und Erdgas auch mit gereinigtem Bio- und Klärgas betrieben werden.

Gasturbinen mit gekoppelter Erzeugung haben eine Leistung von ca. 1 MW bis zur Kraftwerksgrösse von mehreren 100 MW. Seit einigen Jahren werden Konzepte zur Verkleinerung der Gasturbinen mit Leistungen bis hinunter zu ca. 100 kW verfolgt (Mikro-Gasturbinen). Aufgrund ihrer flexiblen Regelbarkeit können Gasturbinen als Spitzenstromerzeuger, zum Beispiel in der Industrie, eingesetzt werden. Ab 10 MW eignen sich Gaskraftwerke (reine Gasturbinen und Kombikraftwerke) zum Betrieb mittlerer Fernwärmenetze, ab ca. 30 MW können grosse Fernwärmenetze beheizt werden. In diesen Fällen wird der produzierte Strom meist direkt in das Elektrizitätsnetz eingespeist. Wenn grosse Wärmeabnehmer oder Fernwärmenetze vorhanden sind, kann Wärme auch aus Grosskraftwerken ausgekoppelt werden. In diesem Fall sinkt im Allgemeinen der elektrische Wirkungsgrad der Kraftwerke.

Brennstoffzellen wird von einigen Fachpersonen ein grosses Potenzial zugeschrieben. Insbesondere werden sie als Schlüsseltechnologie für eine Umstellung auf ein System betrachtet, das auf möglichst kohlenstofffrei produziertem Wasserstoff als Energieträger basiert. Es werden hohe Stromwirkungsgrade erwartet, da die Brennstoffzelle direkt über elektrochemische Prozesse Elektrizität produziert. Als Brennstoff für Brennstoffzellen wird zunächst Erdgas oder Methanol angenommen.

4.2. Betriebsarten

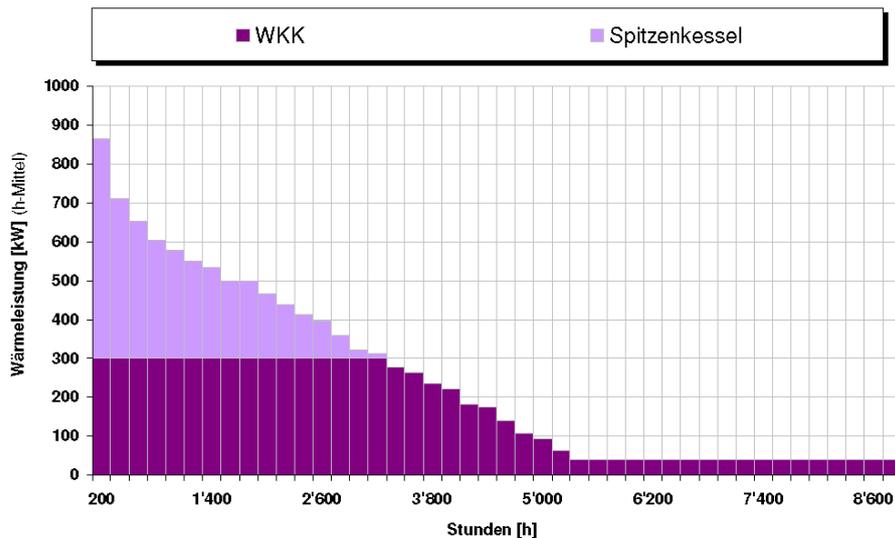
Wenn sich die Leistungsabgabe einer WKK-Anlage (in diesem Fall: ein BHKW) nach dem lokalen Wärmebedarf richtet, handelt es sich um ein *wärmegeführtes* BHKW. Bei der Regelung der Heizleistung werden in modular aufgebauten Anlagen einzelne Aggregate je nach Bedarf ab- oder zugeschaltet. Bei einer Konfiguration mit nur einem Aggregat wird dessen Leistungsabgabe entsprechend gedrosselt. Der erzeugte Strom solcher Anlagen wird, soweit möglich, selbst verbraucht, der Überschuss wird in das öffentliche Netz gespeist und entsprechend verrechnet.

Bei einem *stromgeführten* BHKW richtet sich die Leistungsabgabe nach dem Strombedarf. Die nicht nutzbare Wärme wird in einem Wärmespeicher für eine spätere Nutzung zwischengelagert oder über einen Notkühler als Abwärme an die Umgebung abgegeben. Letzteres reduziert allerdings den Wirkungsgrad.

Wird das Leistungsniveau von einer zentralen Stelle für mehrere Anlagen vorgegeben, spricht man von einem *netzgeführten* BHKW. Die Zentrale optimiert dabei systemübergreifend die Einsatzplanung der dezentralen WKK-Aggregate anhand wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, wie z.B. gemeinsamen Gas- und Reststrombezugsverträgen. Die Netzführung gilt als Kernidee eines virtuellen Kraftwerks.



Bei Fernwärmeverbänden kommen oft *bivalente Heizanlagen* zum Einsatz. Die folgende Figur zeigt modellhaft das Zusammenspiel einer bivalenten Heizanlage, bei welcher die WKK-Anlage durch einen Spitzenheizkessel ergänzt wird. Für die Bereitstellung von Warmwasser und Wärme bis zu einer Leistung von 300 kW wird die WKK-Anlage wärmegeführt betrieben. Wird die benötigte Heizleistung von 300 kW überschritten, wird während 3'200 Stunden im Jahr ein zusätzlicher Spitzenkessel dazu geschaltet. Heute werden die meisten Anlagen als bivalente Anlagen, d.h. zusammen mit einem Spitzenkessel, betrieben.



Figur 7: Deckungsanteile von Grundlastwärme (durch WKK) und Spitzenkessel bei einem ökonomisch optimierten Anlagendesign. Darstellung anhand der Summenhäufigkeit des Wärmeleistungsbedarfs einer Anlage mit Heizung und Warmwasser

4.3. Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen

Die absetzbare Wärme ist für die Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Faktor. Die Wärmenachfrage wird gemäss den aktuellsten Schätzungen schweizweit langfristig zurückgehen.⁷ Die kleinen Anlagen für die Einzelobjektversorgung sind heute nur wettbewerbsfähig, wenn sie hohe Volllaststundenzahlen aufweisen und wenn der produzierte Strom den Bezug aus dem Elektrizitätsnetz ersetzt. Die Schwierigkeit, die Rentabilität zu erreichen, liegt neben den hohen Anlagekosten darin, dass der Brennstoff meistens zu Haushaltskonditionen zu beziehen ist und keine günstige Regelung für die Einspeisung des erzeugten Stroms ins Netz existiert. Die spezifischen Anlagenkosten und die Bezugskonditionen für den Brennstoff sind in den grösseren Leistungsklassen deutlich günstiger.

Methodisch werden die Gestehungskosten der WKK-Anlagen aus den Investitionskosten (Modulkosten und Kosten für einen notwendigen Wärmespeicher, inklusive Anschluss an die Elektrizitäts- und Wärmeinfrastruktur), den festen und variablen Betriebskosten sowie den Brennstoffkosten berechnet. Die Berechnungsmethode verwendet die gleichen gesamtwirtschaftlichen Grundsätze (Abschreibung über Lebensdauer, langfristiger volkswirtschaftlicher Zinssatz) wie bei den konventionellen Kraftwerken.

Bezüglich der Stromgestehungskosten von WKK-Anlagen lassen sich folgende Aussagen machen:⁸

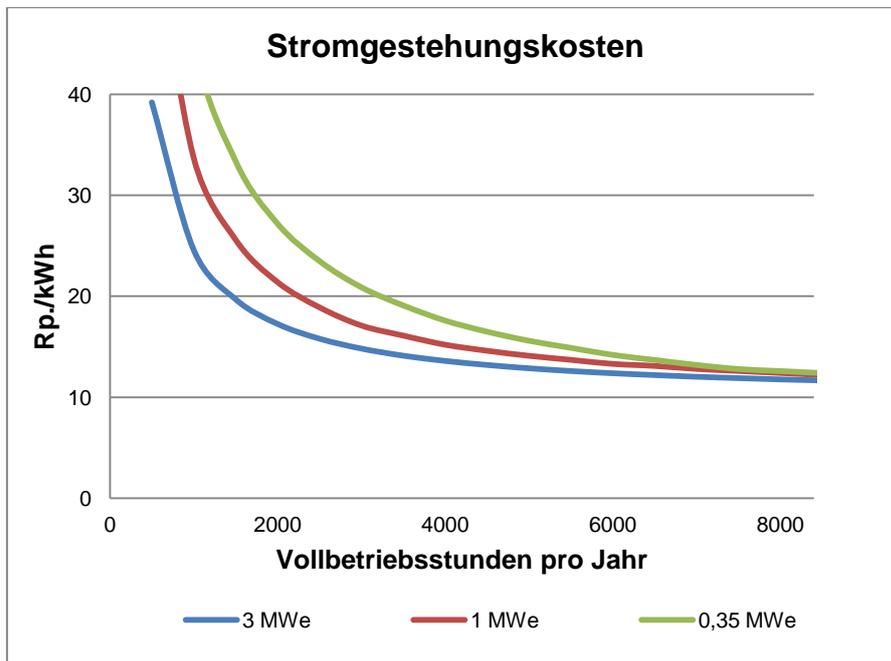
⁷ BFE 2011b. Die Aussage gilt für alle gerechneten Szenarien.

⁸ BFE / Prognos 2007b.



- Innerhalb einer Technologiekategorie (Motoren, Gasturbinen, Brennstoffzellen) sind die spezifischen Investitionskosten im Allgemeinen in den kleineren Leistungsklassen 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. Für relativ neue Technologien (wie z.B. Mikrogasturbinen) sind unter Annahme eines steigenden Absatzes deutlich stärkere Lernkurveneffekte zu erwarten als für konventionelle Technologien (wie z.B. Gasmotoren).
- Im Industriesektor werden WKK-Anlagen besonders dann attraktiv, wenn ganzjährig und möglichst konstant Wärme abgesetzt werden kann. Damit können (teure) Spitzenlastbezüge aus dem Elektrizitätsnetz reduziert werden. Ebenfalls gilt: Je höher die Jahresbetriebsstunden, desto tiefer die Stromgestehungskosten.
- Gaspreise sind, wie bei GuD, ein wichtiger Einflussfaktor für die Höhe der Stromgestehungskosten von fossilen WKK-Anlagen. In den Einsatzbereichen in der Industrie, in grösseren Dienstleistungsobjekten und bei der Nahwärmeproduktion kann davon ausgegangen werden, dass relativ niedrige Brennstoffpreise für industrielle Anwender zur Anwendung kommen. Für die kleinen Leistungsklassen, die in Haushalten sowie kleineren Einzelobjekten eingesetzt werden, muss damit gerechnet werden, dass für die Gaspreise Haushaltstarife gelten. Für beide Verbraucherklassen kann damit gerechnet werden, dass die Gaspreise über jenen eines GuD liegen. Grossverbraucher aus der Stromindustrie haben gegenwärtig meist eigene Gas-Bezugsverträge zu relativ günstigen Konditionen.
- 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.

Figur 8 zeigt die Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von den Vollbetriebsstunden pro Jahr und der Anlagengrösse. Die typische Vollbetriebsstundenzahl liegt im bivalenten Betrieb bei rund 3'200 Betriebsstunden. Je nach Anlagengrösse liegen die Stromgestehungskosten zwischen 15 und 22 Rp./kWh. Bei einer industriellen Anlage, die bis zu 8'600 Stunden pro Jahr betrieben werden kann, spielt die Anlagengrösse eine untergeordnete Rolle. Die Stromgestehungskosten liegen dort bei ca. 12 Rp./kWh. Nicht dargestellt sind Mikro-WKK-Anlagen. Ihre Produktionskosten übersteigen jene von den gezeigten WKK-Anlagen bei weitem (zwischen 30 und 50 Rp./kWh).



Figur 8: Stromgestehungskosten von WKK-Anlagen in Abhängigkeit der Jahresbetriebsstunden und der Anlagengrösse unter folgenden Annahmen: Investitionskosten: 800 bis 1500 Franken pro kW_e, Gaspreis: 7 Rp./kWh, Wärmeerlös: 9 bis 11 Rp./kWh, CO₂-Abgabe: 60 Franken pro Tonne CO₂.
Quelle: BFE

4.4. Gestehungskosten in den Energieperspektiven

Prognos weist in den aktuellen Energieperspektiven (2012) im „Exkurs WKK“ Gestehungskosten von 22 bis 47 Rp./kWh_{el} aus. Diese Zahlen sind nicht ohne Weiteres mit denjenigen im vorliegenden Bericht vergleichbar. Prognos konzentriert sich auf den Ausbau von kleinen – tendenziell teuren – WKK-Anlagen, die in allen Szenarien spezifisch gefördert werden. In den Gestehungskosten von 22 bis 47 Rp./kWh_e sind ausserdem keine Wärmeerlöse inbegriffen.¹⁰

¹⁰ Diese Erlöse werden erst bei der Modellierung des Stromangebotes berücksichtigt.



5. WKK und Gaskombikraftwerke: Systemvergleiche mit Wärmepumpen

Der Einsatz von Wärmepumpen hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Einerseits werden Neubauten häufig mit dieser Technologie ausgestattet, andererseits alte Heizsysteme bei Sanierungen oft durch Wärmepumpen ersetzt.

Wärmepumpen verbrauchen elektrische Energie. Da die Stromproduktion aus Wasserkraft und Sonnenenergie in der kalten Jahreszeit beschränkt ist, stellt sich die Frage, wie die Raumwärme am effizientesten (hinsichtlich verbrauchter Primärenergie) produziert werden kann. Ist es vorteilhafter, wenn der für die Wärmepumpen benötigte Strom aus zentralen GuD oder aus dezentralen WKK stammt? Und wie schneiden diese beiden Systeme im Vergleich zu einem klassischen Heizkessel ab?

Dieses Kapitel geht dieser Frage nach, indem es drei unterschiedliche Systemvergleiche vorstellt. Dabei ist es wichtig, die Definition der Systemgrenzen und den Zeithorizont der einzelnen Studien zu beachten. Je nach deren Definition unterscheiden sich die Resultate massgeblich.

5.1. Energieperspektiven

Im Rahmen der Energieperspektiven wurden unter anderem die zu erwartenden Auswirkungen unterschiedlicher Stromangebotsvarianten auf die CO₂-Emissionen berechnet. Tabelle 2 zeigt die für die Arbeiten zur Energiestrategie 2050 relevanten Resultate.¹¹

Tabelle 2: CO₂-Emissionen ohne Raffinerie-Eigenverbrauch (in Mio. Tonnen) im Szenario „Politische Massnahmen“ und den beiden Angebotsvarianten C&E (zentrale GuD plus Erneuerbare) und C&D&E (GuD plus dezentrale WKK plus Erneuerbare)

		2000	2010	2035	2050
Zentrale GuD plus Erneuerbare	7.2 TWh _e /a GuD	40.8	41.5	27.3	19.6
	3.45 TWh _e /a WKK				
Zentrale GuD plus dezentrale WKK plus Erneuerbare	1.43 TWh _e /a GuD	40.8	41.5	26.8	19.4
	11.24 TWh _e /a WKK				

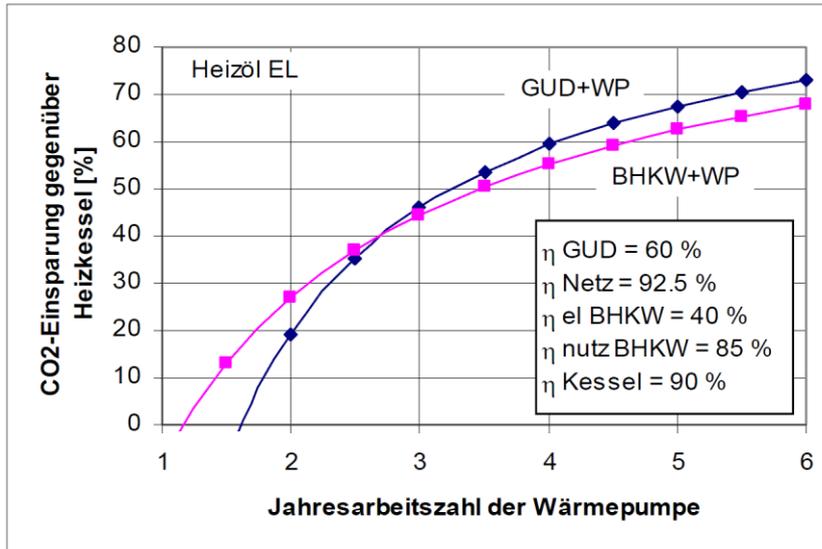
Die gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen liegen im Jahre 2050 bei 19.4 Mio. Tonnen für die Variante mit GuD, dezentralen WKK und Erneuerbaren, resp. bei 19.6 Mio. Tonnen für die Variante mit GuD und Erneuerbaren. Der Anteil erneuerbarer Energien bei der Stromproduktion steigt bei beiden Varianten bis 2050 auf 24.25 TWh. Im Jahr 2035 beträgt die Differenz bei den CO₂-Emissionen in beiden Szenarien rund 0.5 Mio. Tonnen. Mit dem Zubau der Erneuerbaren bis 2050 reduziert sich die Differenz bis auf 0.2 Mio. Tonnen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Variante mit dezentralen WKK-Anlagen bezüglich fossiler Primärenergie (oder CO₂-Emissionen) effizienter ist als die Variante mit vorwiegend GuD.

¹¹ BFE 2011a.



5.2. Hubacher-Studie

Im Rahmen einer Studie zu Grosswärmepumpen aus dem Jahr 2006 wurde unter anderem ein Heizsystemvergleich zwischen einem Heizkessel (Referenz) und den Kombinationen „GuD plus Wärmepumpen“ und „BHKW plus Wärmepumpen“ durchgeführt und die mögliche CO₂-Reduktion in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (JAZ) dargestellt.¹² Die Analyse zeigt, dass die CO₂-Reduktion ab einer JAZ von 2.5 in beiden Kombination sehr ähnlich ist (vgl. Figur 9).



Figur 9: Zusammenhang zwischen der JAZ der Wärmepumpe und der CO₂-Einsparung für die Kombination GuD+WP resp. BHKW+WP (el. Kopplung)

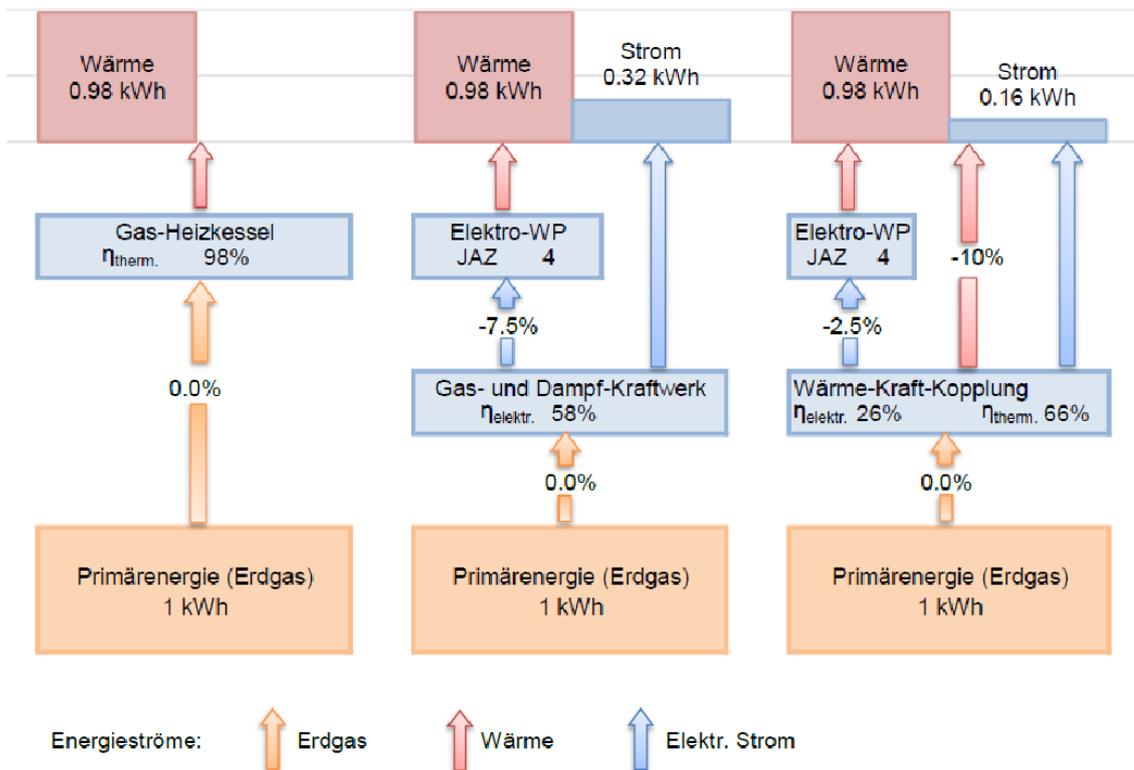
5.3. Awtec-Studie

Im Auftrag der BKW hat awtec in einer Studie 2012 drei Systeme in Bezug auf Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit und CO₂-Emissionen miteinander verglichen.¹³

Gemäss dieser Studie wird unabhängig vom System aus einer Kilowattstunde (kWh) fossiler Primärenergie 0.98 kWh produziert. Das erste System entspricht einem Gasheizkessel mit einem Wirkungsgrad von 98 Prozent. Beim zweiten System handelt es sich um eine Kombination von GuD und Wärmepumpe. Der maximale Wirkungsgrad des GuD beträgt 58 Prozent. Die Übertragungsverluste im Hochspannungsnetz betragen 7.5 Prozent. Die Wärmepumpe produziert, unter der Annahme einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4, wie der klassische Gasheizkessel 0.98 kWh. Der restliche Stromanteil, der für andere Anwendungen eingesetzt werden kann, beträgt 0.32 kWh. Das dritte System ist eine Kombination von WKK und Wärmepumpe. Der Wirkungsgrad der WKK dieses System beträgt 26 Prozent. Die Verluste im Verteilnetz betragen 2.5 Prozent. Die Wärmepumpe produziert wie bei den anderen Systemen 0.98 kWh Wärme. Die Wärmeeinspeisung der WKK ins Fernwärmenetz ist mit weiteren 10 Prozent Wärmeverlusten verbunden. Das führt zu einem Saldo von 0.16 kWh Strom.

¹² Für Details zur Methodik und zu den untersuchten Anlagen vgl. Hubacher Engineering 2006: 9ff. Zum Begriff JAZ siehe Fussnote 5.

¹³ Für Details zur Methodik und Annahmen vgl. awtec 2012: 14ff.



Figur 10: Energieströme (Wärme und Strom) von drei unterschiedlichen Energieerzeugungssystemen (Links: Gasheizkessel, Mitte: GuD und Wärmepumpe, Rechts: WKK und Wärmepumpe). Aus der eingesetzten Primärenergie wird immer die gleiche Menge Wärme erzeugt. Durch die höhere Systemeffizienz der WKK- und GuD-Anlagen fällt zusätzlicher Strom an.¹⁴

5.4 Diskussion

Die Ergebnisse der awtec-Studie zeigen deutlich, wie wichtig die Definition der Systeme ist. So ist die angenommene JAZ der im System eingesetzten Wärmepumpe massgeblich. Diese beträgt in obigen Berechnungen 4. Gemäss Wärmepumpenstatistik 2007 bewegt sich die JAZ je nach Baujahr zwischen 3 und 4 und liegt im Mittel bei 3.15, was einem Baujahr von 1998/1999 entspricht. In den letzten Jahren haben die JAZ bei einem Wert von 3.3 stagniert. Eine JAZ von 3.5 bis 4 ist unter den heutigen Bedingungen nicht gegeben.¹⁵ Zudem ist ein WKK-Wirkungsgrad von 26 Prozent eher pessimistisch gewählt, da bereits bei kleinen Gasmotoren ein Wirkungsgrad von 28 bis 40 Prozent erreicht wird.

Dies bedeutet - das zeigen sowohl die awtec- als auch die Hubacher-Studie - dass je nach JAZ der Wärmepumpe und des Wirkungsgrads der WKK der Vergleich bezüglich fossiler Primärenergie entweder knapp zugunsten der WKK oder der GuD ausfällt.

Im Weiteren zeigen die Studien, dass Wärmepumpen energetisch den Heizkesseln selbst dann vorzuziehen sind, wenn die Elektrizität zum Betrieb der Wärmepumpen aus fossil-thermischen Kraftwerken (GuD oder WKK) stammt.

¹⁴ Awtec-Studie 2012:4.

¹⁵ Hubacher Engineering 2006.



6. Abschätzung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials

6.1. Potenzialbegriffe

Im Zusammenhang mit WKK muss der gängige Potenzialbegriff, wie er insbesondere für erneuerbare Energien angewandt wird, angepasst werden. Im Gegensatz zu den erneuerbaren Energien ist das Potenzial für WKK nicht primär vom Angebot, sondern eher von der Nachfrage (nach Wärme) abhängig. Im Rahmen dieses Berichts werden folgenden Definitionen vorgeschlagen:¹⁶

Das *theoretische Potenzial* beschreibt die gesamte Wärmenachfrage (Prozess- und Raumwärme), die durch WKK-Anlagen bereitgestellt werden kann. Dabei ist davon auszugehen, dass die Nachfrage nach Raumwärme dank verbesserter Wärmeisolation der Gebäude abnehmen wird, während die Nachfrage nach Prozesswärme relativ stabil bleibt.

Das *technische Potenzial* ist eine Teilmenge des theoretischen Potenzials. Sie umfasst die Wärmenachfrage, die unter Berücksichtigung der technischen, aber auch rechtlichen Restriktionen (Umweltauflagen) und des erwarteten Ausbaus der erneuerbaren Energien (Holz, Biogas, Abfall, Wärmepumpen, Solarthermie) abgedeckt werden kann. Je mehr erneuerbare Energien für die Wärmeproduktion verwendet werden, desto kleiner wird das technische Potenzial für Wärme aus WKK-Anlagen. Es besteht eine Konkurrenzsituation zwischen fossiler WKK und dem Ausbau erneuerbarer Wärme.

Das *wirtschaftlich-realisiertbare Potenzial* (kurz: *realisierbares Potenzial*) ist eine Teilmenge des technischen Potenzials. Es wird sowohl durch volkswirtschaftliche als auch durch betriebswirtschaftliche Einflussfaktoren begrenzt. Entscheidend sind zudem die energiepolitischen Rahmenbedingungen, im Speziellen die Förderung der erneuerbaren Energien und der WKK (Fokus und Höhe der Förderung). Die klimapolitischen Rahmenbedingungen sind ebenfalls von grosser Bedeutung (CO₂-Regime, Behandlung der WKK).

Im Zusammenhang mit dem Ausbau von WKK interessiert insbesondere das wirtschaftlich-realisiertbare Potenzial. Da WKK-Anlagen keinen Eingriff in die Landschaft oder die Natur verursachen, entfallen die Begriffe des gesellschaftlichen und des ökologischen Potenzials. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass fossile WKK-Anlagen unter den Aspekten des Klimaschutzes und der Versorgungssicherheit mit gewissen Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben. Zur Ermittlung des technischen und des realisierten WKK-Potenzials werden im Folgenden drei verschiedenen Methoden kurz dargestellt.

6.2. Ermittlung des Potenzials anhand der Nachfrage nach Raum- und Prozesswärme

Ein wichtiger Faktor zur Ermittlung des WKK-Potenzials ist die Nachfrage nach Raum- und Prozesswärme. Der folgende Ansatz verwendet Zahlen aus den Energieperspektiven, ist aber unabhängig davon entwickelt worden. Tabelle 3 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs gemäss des Szenarios der aktualisierten Energieperspektiven, das der Energiestrategie 2050 zugrunde liegt. Die Nachfrage nach Raumwärme reduziert sich im Szenario „Politische Massnahmen“ von heute rund 300 PJ auf etwas mehr als 140 PJ im Jahr 2050. Im Gegensatz dazu nimmt die Prozesswärme nur geringfügig ab, von heute 100 PJ auf 70 PJ im Jahr 2050. Dies zeigt, dass das langfristige WKK-Potenzial vorwiegend bei den industriellen Anlagen liegt. Das gesamtschweizerische theoretische Wärmepotenzial im Jahr 2050 beträgt demnach 210 PJ (140 PJ + 70 PJ). Bei einem mittleren elektrischen Wir-

¹⁶ In der Literatur werden oft andere Potenzialbegriffe verwendet (u.a. im Exkurs zu WKK im Rahmen der Energieperspektiven von Prognos).



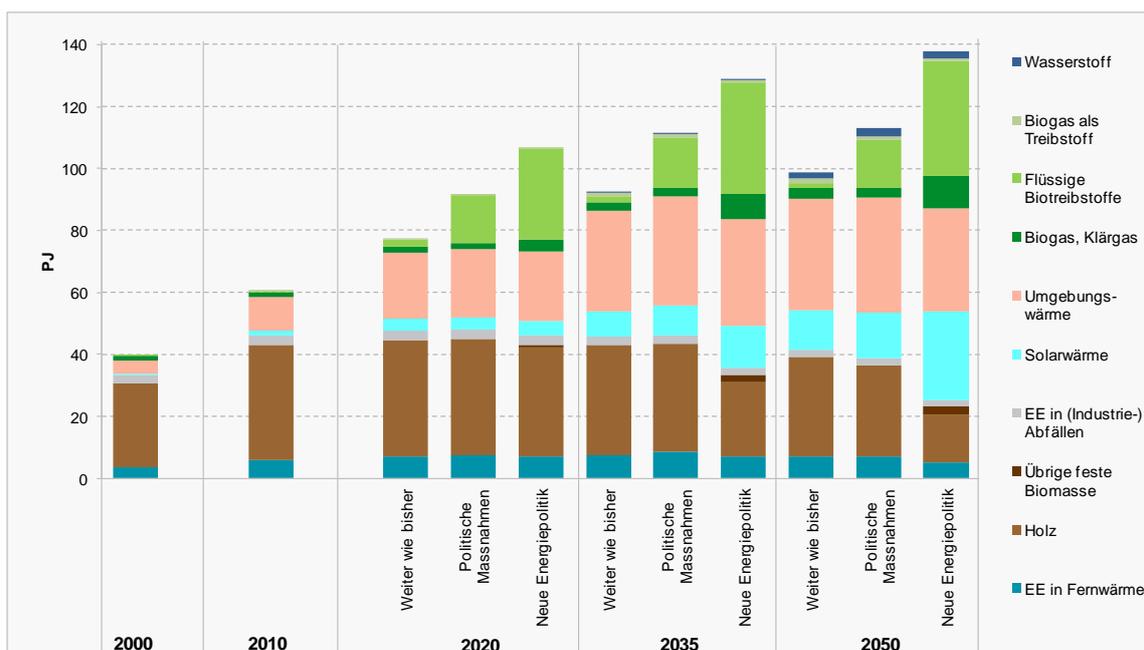
kungsgrad einer WKK-Anlage von 33 Prozent (ein Drittel Strom, zwei Drittel Wärme) ergibt sich ein theoretisches Stromproduktionspotenzial von rund 105 PJ oder 29 TWh.

Tabelle 3: Endenergieverbrauch in PJ nach Verwendungszweck, Szenarien "Weiter wie bisher" (WWB), "Politische Massnahmen" (POM) und "Neue Energiepolitik" (NEP)

Verwendungszweck	2000	2010	2020			2035			2050		
			WWB	POM	NEP	WWB	POM	NEP	WWB	POM	NEP
Raumwärme	271	302	261	256	250	215	193	165	175	141	108
Warmwasser	45	46	48	48	45	48	46	42	48	46	39
Prozesswärme	92	99	96	94	89	85	80	68	76	70	56
Beleuchtung	25	27	24	23	21	23	20	15	23	18	11
Klima, Lüftung & Haustechnik	19	22	28	26	24	37	33	27	51	44	38
I&K, Unterhaltungsmedien	8	10	11	10	10	12	10	9	13	11	8
Antriebe, Prozesse	67	74	75	71	74	76	67	64	80	68	59
Mobilität Inland	239	250	230	224	207	194	174	143	177	150	116
sonstige	11	13	15	14	14	16	16	15	17	17	16
Total Endenergieverbrauch	777	841	788	767	734	706	639	549	658	565	451

Quelle Prognos, 2012

Von diesem theoretischen Wärmepotenzial muss der erwartete Beitrag der erneuerbaren Energien an die Wärmeversorgung abgezogen werden. Figur 11 zeigt die Entwicklung der erneuerbaren Energien (ohne erneuerbare Energien im Strombereich). Nach Abzug der Biotreibstoffe, der Solarwärme (für Warmwasser) und des Wasserstoffs verbleibt ein Beitrag von 80 PJ. Das technische Potenzial für Wärme aus WKK-Anlagen beträgt noch 130 PJ (210 PJ - 80 PJ). Dies ergibt ein technisches Stromproduktionspotenzial von rund 65 PJ oder 18 TWh.



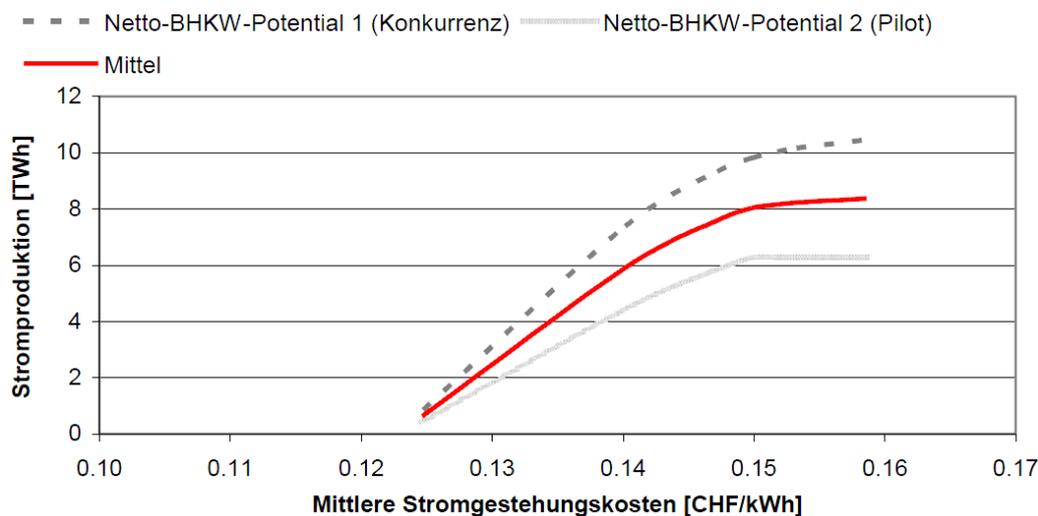
Figur 11: Endenergienachfrage erneuerbare Energieträger, Szenarien „Weiter wie bisher“, „Politische Massnahmen“ und „Neue Energiepolitik“, in PJ (Quelle: Prognos, 2012)



6.3. Ermittlung des Potenzials anhand einer GIS-Analyse und Hochrechnung

Das BFE hat das Ingenieurbüro Eicher+Pauli im Jahr 2011 mit einer Analyse des technischen und des realisierbaren Potenzials der WKK beauftragt.¹⁸ Eicher+Pauli hat dafür ein Informatiktool (GIS) eingesetzt, das die Wärmedichte (Raumwärme und Prozesswärme in der Industrie) für die ganze Schweiz darstellen kann (so genannter top-down Ansatz). Daraus kann das technische Potenzial abgeleitet werden. Ergänzend dazu hat Eicher+Pauli mit einem bottom-up Ansatz, bei dem drei Pilotregionen ausgewählt und auf die Schweiz hochgerechnet wurden, das realisierbare Potenzial berechnet. In beiden Methoden wurde die Konkurrenz zu den erneuerbaren Energien berücksichtigt. Die Studie geht ausserdem davon aus, dass neue WKK-Anlagen nur als Ersatz für bestehende Heizkessel gebaut werden und dass sich der Wärmebedarf bis 2035 dank vermehrter Gebäudeisolation stark verringern wird.

Die folgende Figur 14 zeigt das technische und das realisierbare Potenzial für Strom aus WKK anhand der beiden Methoden (top-down mit GIS für die ganze Schweiz und bottom-up basierend auf der Extrapolation der Pilotregionen). Das so ermittelte technische Potenzial beträgt 10 TWh/a (top-down) und das realisierbare Potenzial 6 TWh/a (bottom-up). Den Potenzialen liegt die Bedingung zugrunde, dass die Stromgestehungskosten 16 Rp./kWh nicht übersteigen.

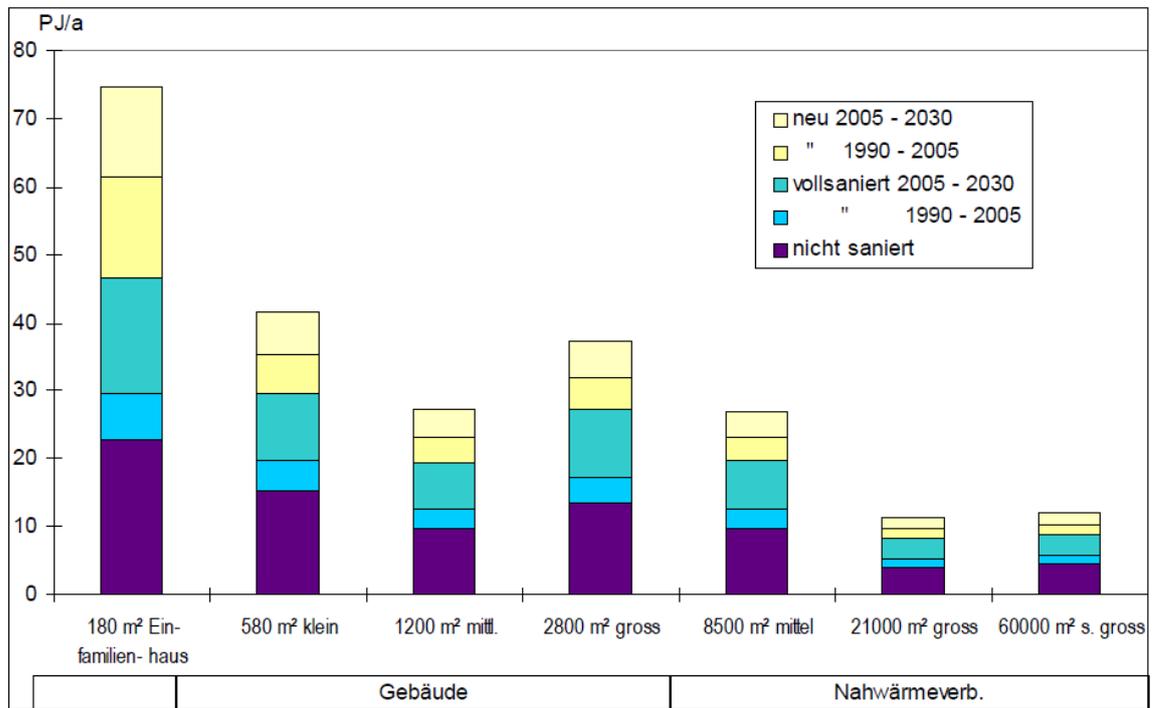


Figur 12: Technisches und realisierbares Potenzial für die Stromproduktion mit WKK. Das Netto-BHKW-Potential 1 (Konkurrenz) entspricht dem technischen Potenzial anhand der gesamtschweizerischen Wärmedichte (GIS-Methode) und das Netto-BHKW-Potential 2 (Pilot) entspricht dem realisierbaren Potenzial anhand einer Hochrechnung der Wärmedichte in drei Pilotregionen.

6.4. Darstellung des Potenzials mittels Grenzkostenkurven

In einer PSI-Studie von 2001 wird die Wärmenachfrage des gesamtschweizerischen Gebäudebestandes in verschiedene Grössenklassen unterteilt und das Stromproduktionspotenzial anhand einer Grenzkostenkurve dargestellt. Figur 13 zeigt die Wärmenachfrage in Abhängigkeit der Gebäudegrösse. Es wird zwischen Neubauten und Sanierungen unterschieden.

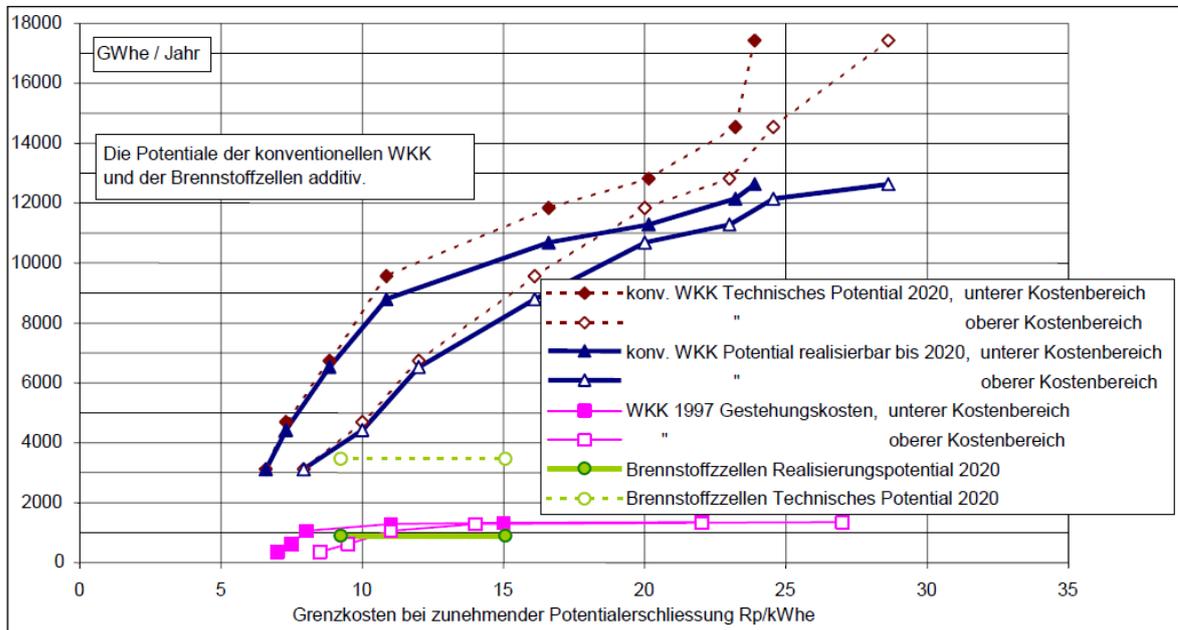
¹⁸ Eicher+Pauli 2011.



Figur 13: Gesamtschweizerischer Raumwärmebedarf in den verschiedenen Gebäudekategorien. Aufstellung gemäss Energieperspektiven BFE 2035 von 1996.¹⁹

Anhand dieser Gebäudekategorien hat das PSI eine Grenzkostenkurve für die Stromgestehungskosten erstellt. Figur 14 zeigt das technische Potenzial von WKK-Anlagen (braune gestrichelte Kurven) und das realisierbare Potenzial (blaue fette Kurven) jeweils in zwei Szenarien (hohe/tiefe Kosten für WKK-Anlagen). Die Steigerung der Grenzkosten bei zunehmender Potenzialerschliessung ist beim realisierbaren Potenzial deutlich zu erkennen. Die Studie geht von einem technischen Potenzial von rund 17 TWh_e und einem maximal realisierbaren Potenzial von 11.5 TWh_e aus, falls der Strompreis bis 30 Rp./kWh steigt. Je nach Kostenvariante kann bei Stromgestehungskosten von 15 Rp./kWh ein Potenzial von 8 bis 10 TWh_e realisiert werden, wobei 3 TWh_e als bereits realisiert gelten.

¹⁹ PSI 2001.



Figur 14: Grenzkostenkurve für Strom aus WKK mit einer oberen und unteren Kostenschätzung sowie den realisierbaren und technischen Potenzialen bis 2020 (Quelle: PSI 2001)

Bei der PSI-Studie ist zu beachten, dass sich die Brennstoffkosten (Erdgas und Heizöl) seit 2001 ungefähr verdoppelt haben, während die Investitionskosten für WKK-Anlagen im Allgemeinen unverändert geblieben sind. Zudem sind heute die CO₂-Kosten hinzuzurechnen. Unter der Annahme, dass sich der Gaspreis seit 2001 um 3 Rp./kWh verteuert hat (und um einen ähnlichen Wert auch die Stromgestehungskosten aus WKK-Anlagen), liegt das realisierbare Potenzial bei 7 bis 9 TWh_e (Verschiebung der Grenzkostenkurve um 3 Rp./kWh nach rechts).

6.5. Diskussion

Die drei Studien sind nicht ohne Vorbehalt miteinander vergleichbar (verschiedenen Annahmen und Methoden, unterschiedliche Zeithorizonte für das realisierbare Potenzial etc.). Trotzdem zeigen die Arbeiten eine gewisse Spannweite auf, in der sich die Potenziale unter den gegebenen Annahmen bewegen dürften.

Das anhand der gesamten Nachfrage nach Raum- und Prozesswärme abgeleitete *theoretische Potenzial* für Strom aus WKK beträgt gemäss Abschätzungen des BFE 105 PJ (29 TWh_e). Ein vergleichbarer Wert von 33.5 TWh_e kann von der Eicher+Pauli Studie abgeleitet werden.

Eine Abschätzung des *technischen Potenzials* (d.h. nach Abzug der Wärme, die durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden kann) bieten die Analysen des BFE und diejenige des PSI. Die Ergebnisse betragen 18 TWh_e (BFE) bzw. 17 TWh_e (PSI).

Bei der Analyse des *realisierbaren Potenzials* machen sich die unterschiedlichen Zeithorizonte und Methoden der drei Studien bemerkbar. Die Eicher+Pauli Studie errechnet eine Bandbreite von 6 bis 10 TWh_e für den Zeithorizont 2035. Die PSI-Studie hat – ausgehend von den Grenzkosten für WKK-Anlagen – bis 2020 eine Bandbreite für das realisierbare Potenzial von 7 bis 9 TWh_e errechnet. Dies basierend auf einer anhand heutiger Gaspreise korrigierten Grenzkostenkurve.



Tabelle 4: Übersicht über die Potenziale in den drei analysierten Studien

	BFE Horizont 2050	Eicher+Pauli Horizont 2035	PSI Horizont 2020
Theoretisches Potenzial	29 TWh _e	33.5 TWh _e	
Technisches Potenzial (Abzug des Beitrags der Erneuerbaren)	18 TWh _e	10 TWh _e	17 TWh _e
Realisierbares Potenzial	-	6 bis 10 TWh _e	7 bis 9 TWh _e

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sowohl die Auswertung des BFE als auch die älteren Abschätzungen des PSI zeigen, dass das technische Potenzial für Strom aus WKK im Bereich von 17 bis 18 TWh_e liegt. Je nach Zeithorizont und den unterlegten wirtschaftlichen Annahmen (resp. der Förderung) ergibt sich ein maximal realisierbares Potenzial von 10 TWh_e.

Für die Ausschöpfung dieses Potenzials ist der Bau zusätzlicher Fernwärmenetze notwendig, sofern die Wärme vollständig genutzt werden soll. Beschränkt man sich auf WKK-Anlagen in Industrieanlagen und grösseren Gebäuden (wie Spitäler, Einkaufszentren etc.), wo keine neuen Fernwärmenetze benötigt werden, liegt das Potenzial bedeutend tiefer.



7. Vor- und Nachteile fossiler WKK-Anlagen

Fossile WKK-Anlagen verfügen über folgende **Vorteile**:

- *Hohe Brennstoffausnutzung durch gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme*
Wesentliches Merkmal der WKK ist, dass durch die gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme der Brennstoffausnutzungsgrad im Vergleich zur getrennten Erzeugung wesentlich erhöht werden kann und somit der erforderliche Primärenergieeinsatz verringert wird.
- *Dezentrale, verbrauchernahe Erzeugung von Strom und Wärme*
In der Regel werden WKK-Anlagen in der Nähe des Wärmebedarfs platziert und erzeugen somit verbrauchernahe Strom und Wärme. Dadurch können Übertragungsverluste gering gehalten werden.
- *Bedarfsgerechte Stromproduktion möglich*
Aufgrund der Anlagencharakteristik ist bei hohem Wärmebedarf eine regelbare Stromproduktion möglich. Damit können die WKK-Anlagen im Winter Elektrizität erzeugen, wenn aus Wasserkraft und Sonnenenergie geringer ist.
- *Hohe Akzeptanz und kurze Realisierungsdauer*
Da die WKK-Anlagen keine sichtbaren Auswirkungen auf Natur und Landschaft haben, ist die soziale Akzeptanz dieser Stromproduktionsanlagen hoch.
- *Ausgereifte und zuverlässige Technologie*
Die Technologie der Verbrennungsmotoren und jene der Gas- und Dampfturbinen sind ausgereift und zuverlässig. Gewisse Verbesserungen beim Wirkungsgrad und den Luftschadstoffemissionen sind noch möglich, z.B. bei den Stirling-Motoren oder Brennstoffzellen.
- *Einsatz erneuerbarer und fossiler Energieträger möglich*
WKK-Anlagen ermöglichen grundsätzlich den Einsatz fossiler als auch erneuerbarer Energieträger.

Zu den **Nachteilen** zählen die folgenden Punkte:

- *Zusätzliche CO₂-Emissionen*
WKK-Anlagen werden meist mit fossilen Brennstoffen betrieben. Dies führt zu entsprechend höheren CO₂-Emissionen.
- *Schadstoffemissionen (NO_x und CO)*
Bei allen Hochtemperatur-Verbrennungsprozessen entstehen Schadstoffe (insbesondere Stickoxide (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO)) sowie Feinstaub.
- *Wärmeabnehmer (und allenfalls Fernwärmenetze) erforderlich*
Damit die theoretische hohe Brennstoffausnutzung in der Praxis auch erreicht werden kann, ist die Sicherstellung des erforderlichen Wärmebedarfes unerlässlich. Optimalerweise soll dieser Wärmebedarf möglichst gleichmässig vorliegen. Da Wärmeabnehmer dezentral vorliegen, sind Nah- und Fernwärmesysteme für die Verteilung der Wärme notwendig. Ein Neubau von Nah- und Fernwärmesystemen ist sehr kostenintensiv und mit einer langen Nutzungsdauer verbunden.
- *Wärmebedarf ist aufgrund verstärkter Gebäudesanierungen tendenziell sinkend*
Aufgrund verstärkter Gebäudesanierungen ist künftig mit einem wesentlich verringerten Wärmebedarf im Gebäudebereich zu rechnen.



- *Kleine Anlagen können oft nicht wirtschaftlich betrieben werden*
Vergleichsweise hohe Stromgestehungskosten bei kleinen Anlagen, zudem Abhängigkeit von volatilen Preisen fossiler Energieträger.
- *Mit fossilen WKK-Anlagen werden gewisse erneuerbare Energien konkurrenziert, was klimapolitisch nicht gewollt ist.*



8. Literatur

- Awtec, 2012. GuD- versus WKK-Strategie, Ersatz von Öl- und Gasheizungen durch effizientere Technologien, im Auftrag BKW.
- BAFU/BFE (2010). Vollzugsweisung Klimaschutzprojekte in der Schweiz 2010
- BAFU, 2012. Klimapolitik der Schweiz nach 2012: Grundlagen für die zukünftige Klimapolitik. Unter: <http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/06577/index.html?lang=de> (Stand: 29.3.2012)
- BFE, 2006. Grosswärmepumpen – energetische und planerische Analyse von zehn Anlagen, Hubacher Engineering
- BFE / Prognos, 2007a. Die Energieperspektiven 2035 – Band 4. Exkurse. Bern: BFE.
- BFE / Prognos, 2007b. Die Energieperspektiven 2035 – Band 5. Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebotes. Bern: BFE.
- BFE, 2010. Anschlussbedingungen für Produzenten von Strom aus erneuerbaren Energien - Anpassung der Empfehlungen. Unter: http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/00616/index.html?lang=de&dossier_id=00794 (Stand: 29.3.2012)
- BFE, 2011a. Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2010, Bern: BFE.
- BFE, 2011b. Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, Frühjahr 2011. Aktualisierung der Energieperspektiven 2035, Bern: BFE.
- BFE, 2011c. Strompreisentwicklung in der Schweiz. Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 08.3280 Stähelin vom 4. Juni 2008. Unter: http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/00613/04787/index.html?lang=de&dossier_id=05069 (Stand: 29.3.2012)
- BFE, 2011d. Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz (Ausgabe 2010). Unter: http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/index.html?lang=de&dossier_id=00774 (Stand: 29.3.2012)
- BFE, 2012a. Hubacher Consulting: Fortsetzung des Feldmonitorings von WP-Anlagen mittels Feldmessungen, Analyse des Langzeitverhaltens und Bestimmung der Effizienz für das Modell der Wärmepumpenstatistik.
- BFE, 2012b. Marktpreis gemäss Art. 3 j, Abs. 2 EnV. Unter: http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?lang=de&dossier_id=03136 (Stand: 29.3.2012)
- BGR, 2010. Annual Report. Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2010. Unter: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Produkte/annual_report_2010-summary_en.html (Stand: 29.3.2012)
- BMWi, 2011 Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/energie,did=405004.html> (Stand: 29.3.2012)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011 Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft
- Consentec GmbH, 2010. „Wirtschaftlichkeit dezentraler Einspeisung auf die elektrischen Netze der Schweiz, BFE, unter:



http://www.bfe.admin.ch/forschungewg/02544/02810/index.html?lang=de&dossier_id=04386
(Stand: 25.08.2012).

Dettli R. / Baur M. / D. Philippen D. / Kernen M., 2007. Potenzial erneuerbarer Energien in grösseren fossilen Feuerungen, unter: http://www.econcept.ch/uploads/media/720_zf.pdf (Stand: 29.3.2012)

Eicher+Pauli, 2011. Ausbau von WKK in der Schweiz. WKK-Standortevaluation auf Basis einer GIS-Analyse, Schlussbericht.

Erdmann, Georg, 2010. Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland, TU Berlin.

Hubacher Engineering, 2006. Grosswärmepumpen – energetische und planerische Analyse von zehn Anlagen.

Kaufmann, U. / Gutzwiller, St., 2010. Thermische Stromproduktion inklusive WKK (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2009, Bern: BFE.

PSI, 2001. Perspektiven der zukünftigen Strom und Wärmeversorgung für die Schweiz.