



F. Rognon, November 2008

Effizientere Nutzung von fossilen Brennstoffen und Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Erzeugung von Raumwärme und Elektrizität in der Schweiz

**Begriffe und Eigenschaften von Kernkraftwerken, Gaskraftwerken,
Gas-Kombi-Kraftwerken und Wärme-Kraft-Kopplung**

**Deckung Wärmebedarf und Stromproduktion durch Kombination
mit Wärmepumpen, Holzheizungen und Solarthermische Anlagen**



Autor:

BFE

Sektion Erneuerbare Energien

F. Rognon

Marktbereichsleiter Wärmepumpen, Kälte, Wärme-Kraft-Kopplung, Kraftwerk2020



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Zusammenfassung | 4 |
| 2. | Um was geht es ? | 5 |
| 3. | Wie wird Strom aus Brennstoff produziert? | 5 |
| 4. | Welche Leistungen haben die verschiedenen Kraftwerke ? | 8 |
| 5. | Wie effizient sind die verschiedenen Kraftwerke? | 9 |
| 6. | Muss die Abwärme in jedem Fall genutzt werden? | 10 |
| 7. | Was sind die wesentlichen Umweltauswirkungen ? | 13 |
| 8. | Wieviel kostet der Strom? | 14 |
| 9. | Wie kann das CO ₂ der fossilen Stromerzeugung kompensiert werden? | 15 |
| 10. | Wieviele Kraftwerke sind notwendig ? | 18 |
| 11. | Abkürzungen | 22 |
| 12. | Bibliographie | 23 |
| 13. | Annahmen | 24 |
| 14. | Berechnungen | 25 |



1. Zusammenfassung

Durch den Einsatz von 400'000 Wärmepumpen können im Jahr 2020 die CO₂-Emissionen um 8% gesenkt werden. Dies ist mit dem bisherigen und heutigen Rhythmus der Sanierungen der 1 Million bestehenden Heizungen möglich. Der Antriebsstrom kann aus 10'000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen herkommen, welche bestehende Heizungen ersetzen oder ergänzen.

Das Potential der Substitution von Öl- und Gaskesseln durch erneuerbare Heizungen und fossile Stromerzeugung ist aber erheblich grösser: Der Ersatz von 1'000'000 Öl- und Gaskesseln durch 400'000 Holzkessel, 600'000 Wärmepumpen und 30'000 fossile Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen plus den Bau von 2 Gas-Kombi-Kraftwerken ohne Wärmenutzung bringt eine Reduktion der schweizerischen CO₂-Emissionen von 20% und eine Erhöhung der Stromproduktion von 12TWh oder 20% des Verbrauches des Jahres 2007.

Beste elektrische Nutzungsgrade bei der Stromerzeugung erreichen fossile Gas-Kombi-Kraftwerke ohne Wärmeauskopplung und dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen über 100 kW elektrischer Leistung mit Wärmenutzung.

Die Wärmenutzung durch Auskopplung reduziert den elektrischen Wirkungsgrad von Dampfkraftwerken, also von Kern-, Gas-, Kohle- und Gas-Kombi-Kraftwerken. Sie ist deshalb je nach jeweiligen Bedürfnissen sorgfältig zu prüfen (Wärmemengen, Temperaturen).

Die gesamte Effizienz von Gas-Kombi-Kraftwerken ohne Wärmeauskopplung ist besser als diejenige von Gas-Kombi-Kraftwerken mit Wärmenutzung über Fernwärme, wenn mindestens ein Drittel ihres Stroms für den Antrieb von Wärmepumpen verwendet wird.

Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen über 100 kW elektrischer Leistung haben einen gleich guten oder besseren Gesamtnutzungsgrad als Gas-Kombi-Kraftwerke, vorausgesetzt, sie nutzen die Wärme vollständig und die Schadstoffemissionen werden nach dem Stand der Technik durch entsprechende Massnahmen so tief wie bei Öl- oder Gaskesseln gehalten.



2. Um was geht es ?

In den Debatten über die zukünftige Stromversorgung werden neue thermische Kraftwerke thematisiert. Nachfolgend werden Begriffe, Eigenschaften und Möglichkeiten von verschiedenen solchen Kraftwerkstypen vorgestellt.

Bisher wurden oft zwei extreme Varianten betrachtet: einerseits die dezentrale Versorgung mit mehreren 100'000 kleinen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) von je einigen Kilowatt und andererseits die zentrale Versorgung mit 2 bis 3 Kraftwerken von je einigen Hunderten Megawatt. Auch ein weiterer Weg ist möglich: wärmedimensionierte WKK mittlerer Leistung (200kW bis 5'000kW Heizleistung).

Es geht NICHT um einen Vergleich, es geht auch nicht um eine Bewertung. Die Reihenfolge der Aufzählungen bedeutet keine Rangliste oder Klassifizierung. Die Systeme werden lediglich beschrieben. Es werden auch nur Potentiale angegeben, keine Prognosen gemacht und keine Strategie abgeleitet. Es werden absichtlich nur die für die Bilanzgrenze Schweiz relevanten Kraftwerkstypen beschrieben. Und es werden ausschliesslich handelsübliche Komponenten und Systeme berücksichtigt, welche im Jahr 2007 in der Schweiz verfügbar waren.

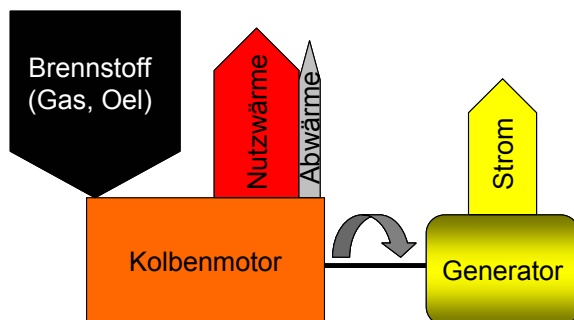
3. Wie wird Strom aus Brennstoff produziert?

In einem thermischen Kraftwerk wird die chemische Energie eines Brennstoffes in Wärme und Kraft (Strom) umgewandelt. Dies erfolgt meist durch Verbrennung des Brennstoffes oder durch Kernspaltung schwerer Atome (Fission). Die Vielfalt der Technologien gliedert sich in 2 Typen.

Typ 1.

Die Verbrennungsenergie wird direkt in mechanische Bewegung und Wärme umgewandelt. Eine Verbrennungsmaschine (Motor, Turbine) nutzt gasförmigen oder flüssigen Brennstoff (Erdgas, Biogas, Diesel- oder Bioöl, Ethanol) und treibt einen Stromgenerator an (Beispiel: Gasmotor-Blockheizkraftwerk, Gasturbine). Typ 1 wird oft allgemein als „WKK“ bezeichnet, auf englisch „cogeneration“ oder „cogen“.

Prinzipschema:



Die dezentralen WKK-Anlagen (Typ 1) werden handelsüblich als komplette, anschlussfertige Module zur Strom- und Wärmeerzeugung, meist auf Basis von Kolbenmotoren, aber auch von Kleinturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen, angeboten.

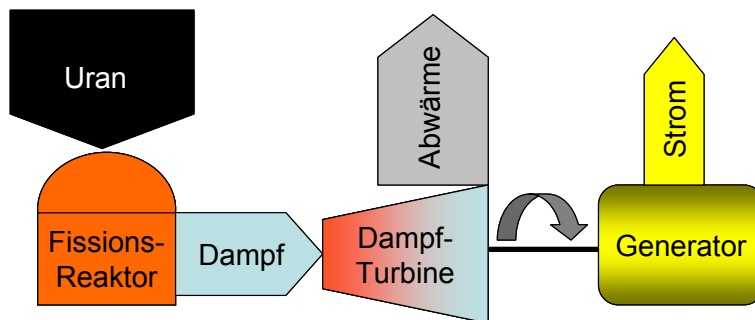


Typ 2.

Die chemische Energie wird zuerst in Wärme umgewandelt, an einen Wärmeträger übertragen und dann in Bewegung umgewandelt. Durch Verbrennung von festem, flüssigem oder gasförmigem Brennstoff (Kohle, Holz, Öl, Gas, Wasserstoff) in einem Kessel wird meist heisser Wasserdampf unter hohem Druck produziert. Dieser Dampf treibt eine Dampfturbine an, welche den Stromgenerator antreibt. Die meist verwendeten und für die zukünftige Stromversorgung der Schweiz in Frage kommenden Systeme sind folgende thermische Kraftwerke:

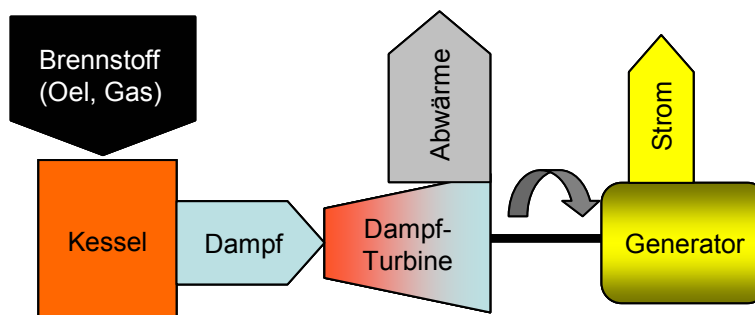
- Kernkraftwerk (KKW): die Fission (Spaltung) von Atomen (z. Bsp. Uran) gibt Wärme frei, welche Dampf erhitzt. Eine Dampfturbine treibt den Stromgenerator an.

Prinzipschema:



- Fossiles Kraftwerk: Verbrennung von fossilem Brennstoff in einem Kessel erzeugt Dampf. Die Dampfturbine treibt den Stromgenerator an. Es sind mehrere Brennstoffe einsetzbar: Kohle, Schweröl, Öl, Gas, Flüssiggas, synthetische Gase.

Prinzipschema:



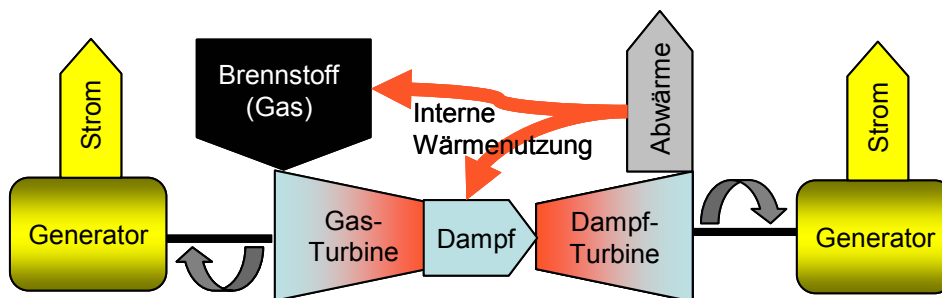
- Mit erneuerbaren Energien betriebene Dampfkraftwerke. In Frage kommen die tiefe Geothermie und die Biomasse.



Typ 1 und Typ 2 kombiniert

Kombi-Kraftwerk: kombiniert eine Verbrennungsmaschine mit einer Dampfanlage. Brennstoff (Öl, Gas, Flüssiggas, Bio-Brennstoffe, synthetische Gase) wird in einer Gasturbine verbrannt, die einen ersten Stromgenerator antreibt. Die Wärme aus den heißen Abgasen wird für die Erzeugung von Dampf genutzt. Eine Dampfturbine treibt dann einen zweiten Stromgenerator an. Beispiel: Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD).

Prinzipschema:



Grundsatz für Typ 1 und Typ 2

Wärme-Kraft-Kopplung (WKK): thermisches Kraftwerk, welches Strom UND nutzbare Wärme gleichrangig und gleichzeitig erzeugt. WKK-Anlagen werden nach dem Wärmebedarf dimensioniert und nicht nach dem Strombedarf, so dass die Wärme voll genutzt werden kann. Aus Verbrennungsmaschinen (meist Kolbenmotoren aber auch Stirling-Motoren, Brennstoffzellen, Gasturbinen) wird deren Abwärme genutzt – eine Reduktion des elektrischen Nutzungsgrads ist damit nicht verbunden.

Wärme kann auch aus Dampfprozessen entnommen werden, um direkt als Wärme genutzt zu werden (Wärmeauskopplung aus dem Dampfkreislauf); der elektrische Wirkungsgrad der Anlage wird dadurch vermindert – je nach Entnahmetemperatur und –menge allerdings nur um typischerweise 1/4 bis 1/8 der ausgekoppelten Wärme. Mehr dazu im Kapitel 6.

Agrund der bisherigen Erfahrungen werden in der Schweiz unter dem Begriff „WKK“ Anlagen vom Typ 1 verstanden.



4. Welche Leistungen haben die verschiedenen Kraftwerke?

Das Spektrum der elektrischen Leistungen ist sehr breit und wird nachfolgend dargestellt, sortiert nach abnehmender elektrischer Leistung.

Die dezentralen WKK-Anlagen (Typ 1) werden handelsüblich als komplette, anschlussfertige Module zur Strom- und Wärmeerzeugung, meist auf Basis von Kolbenmotoren, aber auch von Kleinturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen, angeboten.

| Kraftwerkstyp | Maximale elektrische Leistung | | Typische Verwendung |
|---------------------|-------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | pro Einheit | pro Anlage | |
| Kernkraftwerk | 300 bis 1600 MW | 1600 MW | Stromerzeugung in der Regel ohne Wärmenutzung. Die Abwärme nach dem Dampfkreislauf entsteht aus einem zu tiefen Niveau für Verteilung mit Fernwärmenetz. |
| Gaskraftwerk | 10 bis 100 MW | 500 MW | |
| Gas-Kombi-Kraftwerk | 100 bis 500 MW | 1600 MW | |
| WKK "gross" (Öl) | 1 MW bis 17 MW | 200 MW | Stromerzeugung mit teilweise bis ganze Wärmenutzung |
| WKK „gross“ (Gas) | 1 MW bis 16 MW | 200 MW | |
| WKK „mittel“ (Gas) | 0.10 bis 1 MW | 10 MW | Stromerzeugung mit voller Wärmenutzung |
| WKK „mittel“ (Öl) | 0.10 bis 1 MW | 10 MW | |
| WKK „klein“ (Gas) | 0.01 bis 0.10MW | 1 MW | |

Tabelle 1: handelsübliche Kraftwerke, Leistung pro Modul und pro Anlage

Die Vielfalt der Technologien erlaubt ein breites Einsatzspektrum. Als Vergleich: die Stadt Bern benötigt im Schnitt eine elektrische Leistung von rund 200MW.



5. Wie effizient sind die verschiedenen Kraftwerke?

Die Effizienz wird mit Wirkungsgraden und Nutzungsgraden ausgedrückt. Diese sind nicht identisch.

Der Wirkungsgrad ist ein Leistungsverhältnis. Die erzeugte thermische und elektrische Leistung werden addiert und durch die Verbrauchleistung an Brennstoff dividiert. Es bildet also eine Momentaufnahme des Systems bei einem bestimmten Betriebszustand.

Der Nutzungsgrad ist ein Verhältnis von Energiemengen über eine Zeitperiode. Die jährlich erzeugte bzw. genutzte thermische und elektrische Energie werden addiert und durch die jährlich verbrauchte Brennstoffenergie dividiert.

Die elektrischen Wirkungsgrade und die entsprechenden Nutzungsgrade sind je nach Leistungsgrösse und Anlagentyp sehr unterschiedlich. Die energetischen Kennwerte der verschiedenen Technologien sind nachfolgend dargestellt. Die Werte gelten für handelsübliche Systeme nach dem Stand der Technik im Jahr 2007. Die angegebenen Nutzungsgrade verstehen sich als Jahresdurchschnittswerte der produzierten Strommengen dividiert durch den Verbrauch von Primärenergie der ganzen Anlage inklusiv Hilfsantriebe und Nebenaggregate.

| Kraftwerkstyp | Elektrischer Nutzungsgrad Stand heute | | Kommentar |
|---------------------|------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Minimum | Maximum | |
| Kernkraftwerk | 30% | 35% | Die Abwärme nach dem Dampfkreislauf entsteht aus einem zu tiefen Niveau für Verteilung mit Fernwärmenetz. |
| Gaskraftwerk | 25% | 45% | |
| Gas-Kombi-Kraftwerk | 45% | 58% | |
| WKK 1 bis 20MW | 38% | 47% | Anlagen vom Typ 1, Seite 5. Werte sind abhängig vom Brennstoff (Öl oder Gas) und von der Grösse des Aggregates. |
| WKK 0.1 bis 1MW | 30% | 41% | |
| WKK unter 0.1MW | 20% | 35% | |

Tabelle 2: handelsübliche Kraftwerke, jährliche elektrische Nutzungsgrade nach Leistungsklassen, bei maximaler Stromproduktion

Der elektrische Nutzungsgrad von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) steigt mit zunehmender elektrischer Leistung. Kernkraftwerke (KKW) und Gaskraftwerke (GKW) besitzen für ihre Leistungsklassen die tiefsten elektrische Nutzungsgrade. Gas-Kombi-Kraftwerke (GuD) erreichen die höchsten elektrischen Nutzungsgrade.



6. Muss die Abwärme in jedem Fall genutzt werden?

Die Effizienzangaben (Nutzungsgrade) über die verschiedenen Kraftwerkstypen sind nicht einfach zu vergleichen: Gas-Kombi-Kraftwerke erreichen 58% (elektrisch, ohne Abwärmenutzung), Wärme-Kraft-Kopplung erreichen 90% (35% Strom und 55% Wärme) und ein Gaskessel erreicht 100% (nur Wärme, kein Strom). Was ist effizienter als was? Dürfen die verschiedenen Effizienzen (Nutzungsgrade) einfach addiert werden?

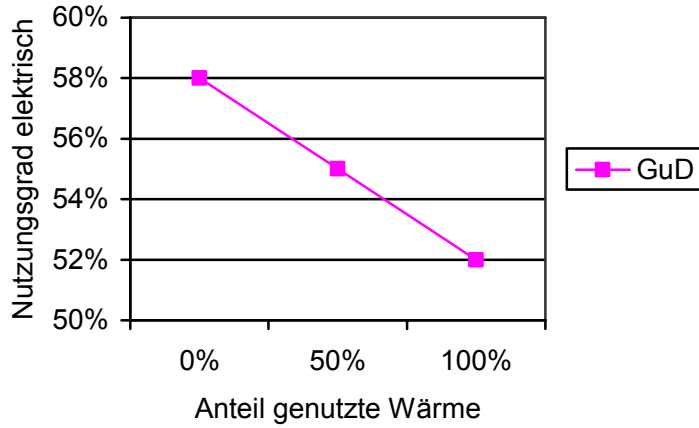
Wärme und Strom sind zwei Energieformen, welche physikalisch ganz verschiedene Eigenschaften besitzen:

- Strom lässt sich sehr einfach transportieren, über kurze oder lange Distanzen. Ferner ist er beliebig und praktisch verlustfrei in andere Energieformen umwandelbar: aus der Steckdose kann Licht eingeschaltet werden, Wasser beheizt, Staubsauger angetrieben, usw.
- Wärme lässt sich nicht einfach fern transportieren: bei vergleichbarer Leistung ist die notwendige Infrastruktur aufwendig (Fernwärmerohre, Wärmedämmung, Pumpenergie). Ferner lässt sich Wärme schlecht und begrenzt in anderen Energieformen umwandeln. Beispiel: Wärme aus einem Fernwärmenetz von 110°C Vorlauf lässt sich nur mit grossem technischen Aufwand und einer Effizienz von maximal 5% in Strom „rückumwandeln“!

Die entstehende Wärme von Kraftwerken wird möglichst prozessintern genutzt: Bei KKW und GWK wird das Speisewasser des Dampfkreislaufs vorgewärmt und bei GuD werden noch der Brennstoff und die Luft für die Brennkammer vorgewärmt. So wird der elektrische Nutzungsgrad maximiert. Die anfallende restliche Abwärme liegt auf einer so tiefen Temperatur - 30 bis 35°C – , dass sie nicht mehr nutzbar ist.

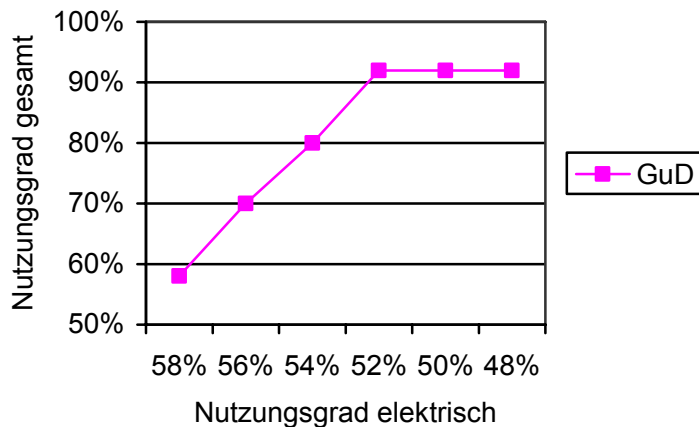
Falls die Wärme eines Kraftwerkes extern über Nah- oder Fernwärme genutzt werden soll, muss die Vorlauf-Temperatur etwa 110°C betragen. Die externe Nutzung der Abwärme nach dem Dampfprozess ist nicht möglich. Sie ist nur durch Entnahme im Dampfkreislauf möglich, verursacht aber eine Reduktion des elektrischen Wirkungsgrades.

In der nachfolgenden Figur 1: elektrischer Nutzungsgrad in Funktion des Anteils der genutzten Wärme ist der Verlauf des elektrischen Nutzungsgrades in Funktion des Anteils der genutzten Wärme von Gas-Kombi-Kraftwerken (GuD) gerechnet (Werte aus [12]). Die maximale nutzbare Wärme (100%) ist die Wärmemenge, welche vom Dampfprozess ohne Zusatzfeuerung für Fernwärme von 110°C technisch nutzbar ist.



Figur 1: elektrischer Nutzungsgrad in Funktion des Anteils der genutzten Wärme

Die Wärmenutzung reduziert den elektrische Nutzungsgrad. Bedingt durch den Dampfprozess können nur gewisse Werte von thermischen und elektrischen Leistungen bzw. Nutzungsgraden bei der Auslegung des Dampfkreislaufes variiert werden. In der Figur 2: gesamter Nutzungsgrad (Strom+Wärme) in Funktion des elektrischen Nutzungsgrades ist der gesamte Nutzungsgrad (Strom und Wärme zusammen) in Funktion des elektrischen Nutzungsgrades dargestellt.



Figur 2: gesamter Nutzungsgrad (Strom+Wärme) in Funktion des elektrischen Nutzungsgrades

Mit abnehmendem elektrischen Nutzungsgrad steigt also der gesamte Nutzungsgrad und erreicht das Maximum von 92% bei einem elektrischen Nutzungsgrad von 52%. Eine weitere Reduktion des elektrischen Nutzungsgrades bringt keine energetischen Vorteile.



Die effiziente Wärmeauskopplung setzt zwei Bedingungen voraus:

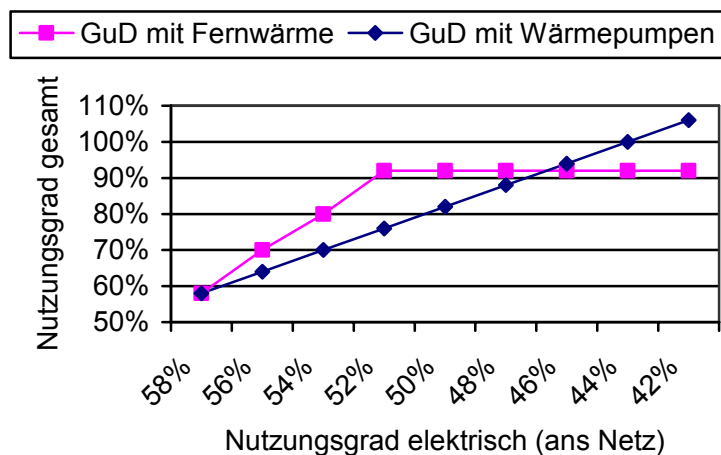
1. es müssen genügend Wärmeabnehmer in der Nähe des Kraftwerkes liegen.
2. Wärmeabnehmer müssen die Wärme dann benötigen, wenn das Kraftwerk läuft. Kraftwerke laufen 3500 bis 5000 Stunden im Jahr und Wärmeabnehmer für Raumheizung und Warmwasser brauchen thermische Energie während 1600 bis 2200 Stunden im Jahr, davon knapp 200 Stunden mit voller Leistung.

Wärme aus einem Kraftwerk kann also nur die Bandlast an Wärmeleistung für Raumwärme und Warmwasser abdecken, welche circa 1/6 des Spitzenbedarfes beträgt. Zahlenbeispiel: ein Gas-Kombi-Kraftwerk von 400MW liefert bei optimaler Wärmeauskopplung genug Heizenergie für rund 500'000 Einwohner.

Die Wärmeauskopplung aus GuD, GWK und KKW ist also sorgfältig nach den jeweiligen Bedürfnissen zu prüfen.

In der Schweiz liegen meistens nie so viele Einwohner in der wirtschaftlich vertretbarer Nähe von Kraftwerken. Die optimale Wärmenutzung mit Fernwärme ist kaum realistisch.

Wärme kann aber durch elektrisch angetriebene Wärmepumpen erzeugt werden. Falls der Antriebsstrom aus GuD ohne Wärmenutzung stammt, dann wird die netto ans Netz abgegebene Strommenge dadurch reduziert. Der Vergleich mit der Wärmenutzung über Fernwärme ist in Figur 3: gesamter Nutzungsgrad (Strom+Wärme) in Funktion des elektrischen Nutzungsgrades dargestellt.



Figur 3: gesamter Nutzungsgrad (Strom+Wärme) in Funktion des elektrischen Nutzungsgrades

Diese „indirekte“ Lösung mit elektrischen Wärmepumpen ist energetisch vorteilhaft, sobald 1/3 des Stromes aus GuD für deren Antrieb verbraucht wird.

Diese Lösung wird in Kapitel 9 näher beschrieben.



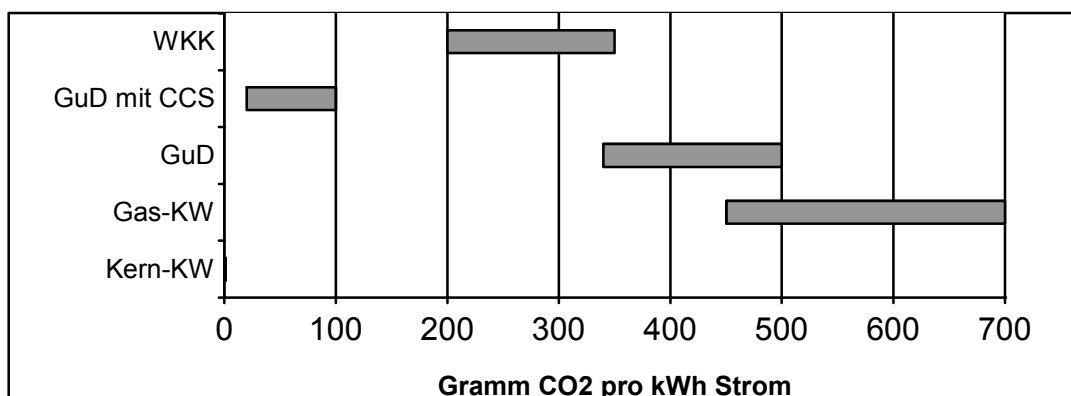
7. Was sind die wesentlichen Umweltauswirkungen?

Kernkraftwerke erzeugen in Betrieb nahezu keine CO₂-Emissionen. Aufzuarbeiten (auch mit fossilen Energien) und zu lagern sind Uran und radioaktive Abfälle.

Die mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerke erzeugen verschiedene Schadstoffe, hauptsächlich NOx und Russ sowie das Treibhausgas CO₂. NOx und Russ lassen sich technisch einwandfrei bis auf geringe Werte reduzieren. Das CO₂ bleibt: pro kWh Strom erzeugen gasbefeuerte GuD rund 360 g CO₂, GWK etwa 500, Gas-WKK 250 und Diesel-WKK 350 (bei voller Wärmenutzung). Kohlekraftwerke erzeugen rund 1000g pro kWh.

Die Umweltauswirkungen können je nach Technologie folgendermassen reduziert werden:

- Kernkraftwerk: Reduktion der Menge und der Abfälle durch Prozessoptimierungen. Eine Aufbereitung und eine Endlagerung der Abfälle bleibt notwendig;
- Gas-Kombi-Kraftwerk und Gas-Kraftwerk
 - o durch Abscheidung und Sequestrierung (Speicherung in geeigneten geologischen Schichten) kann bis 90% des CO₂ eliminiert werden. Die Abscheidung erfolgt entweder vor der Verbrennung („Entkarbonisierung“ des Erdgases und dann Verbrennung von reinem Wasserstoff) oder nach der Verbrennung durch chemische Trennung in den Abgasen. Beide Prozesse benötigen Energie, was den gesamten elektrischen Nutzungsgrad um 10 bis 15% (absolut) reduziert. Der Prozess wird oft CCS abgekürzt (aus dem englisch carbone capture and storage).
 - o durch Beimischung von Bio-Brennstoffen zu den fossilen Brennstoffen (übers Gasnetz oder vor Ort) kann der CO₂-Ausstoss bis ca. 25% (grosse GuD) reduziert werden. Der elektrische Nutzungsgrad wird nur geringfügig um circa 5% absolut reduziert.
- WKK: durch Beimischung von Bio-Brennstoffen zu den fossilen Brennstoffen (übers Gasnetz oder vor Ort) kann der CO₂-Ausstoss um bis 100% reduziert werden. Von der Grösse her sind WKK für eine örtliche Nutzung biogener Brennstoffe optimal.



Figur 4: Bandbreite der CO₂-Emissionen in Gramm pro kWh Strom während Betrieb



8. Wieviel kostet der Strom?

Die Gestehungskosten des Stromes am Austritt des jeweiligen Kraftwerkes betragen etwa:

| Kraftwerkstyp | Stromgestehungskosten, auf 0.5 Rappen gerundet (ohne CO ₂ -Abgabe, Ölpreis vom 2006) | Grösster Einflussfaktor auf Gestehungskosten |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| KKW | 4 bis 5.5 | Kapitalkosten Laufzeit im Jahr |
| GKW | 6.5 bis 11 | Brennstoff-Preis Laufzeit im Jahr |
| GuD | 5 bis 6.5 | |
| GuD mit CCS | 7 bis 11 | |
| WKK – 1 bis 20MW | 8 bis 15 | Brennstoff-Preis, Laufzeit im Jahr |
| WKK - 0.1 bis 1MW | 10 bis 15 | |
| WKK – < 0.1MW | 13 bis 28 | |

Tabelle 3: Stromgestehungskosten für verschieden Kraftwerke

KKW bedingen grosse Investitionen, also Kapitalkosten, haben aber verhältnismässig tiefe Brennstoff-Kosten; hinzu kommen noch Kosten für Aufarbeitung des Urans und Lagerung der radioaktiven Abfälle. Bei Kraftwerken mit Gas, Öl oder Kohle betragen die Brennstoffkosten 70 bis 75% der jährlichen Kosten. WKK haben tendenziell höhere spezifische Wartungskosten. Dabei spielen die jährliche Laufzeit und der Verkauf der ganzen Wärme eine zentrale Rolle.

Preisvergleiche müssen sorgfältig erfolgen. Typischerweise wird Strom aus den grossen Kraftwerken auf Hochspannungsebene eingespeist. Er muss dann bis zum Endverbraucher transportiert und bis auf Niederspannung transformiert werden. WKK erzeugen den Strom auf Mittel- oder Niederspannung näher bei den Endverbrauchern, was weniger Transport- und Transformationskosten bedeutet. Ferner können sie dazu beitragen, Lastspitzen zu glätten, was sich im Betrieb finanziell positiv auswirken kann.

Pauschale Aussagen sind also oft nicht zutreffend. Eine sorgfältige Analyse und Beurteilung des Bedarfsprofils des Stromverbrauchers und des Umfeldes des Stromverteilers bzw. –Produzenten muss in jedem Fall erfolgen.

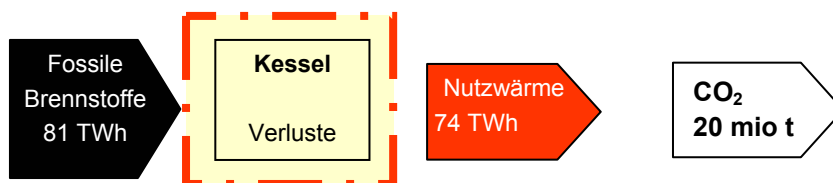


9. Wie kann das CO₂ der fossilen Stromerzeugung kompensiert werden?

Einfach dort, wo viel CO₂ entsteht und Lösungen vorhanden sind: bei den Heizungen.

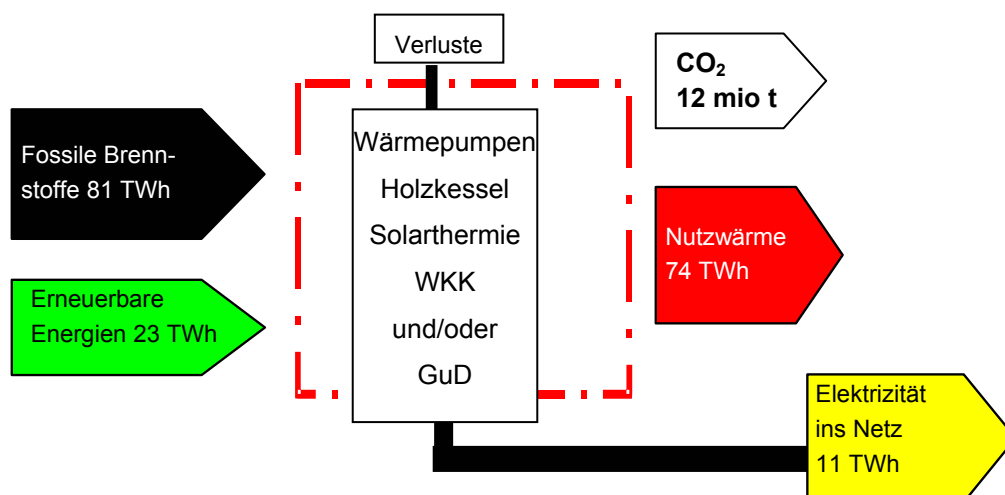
In der Schweiz wird Wärme tiefer Temperatur für Raumwärme und Aufbereitung von Warmwasser zu 80% durch Verbrennung von Brennstoffen erzeugt. Im Jahr 2000 waren in der Schweiz eine Million Öl- und Gas-Kessel in Betrieb, welche etwa die Hälfte der 41.1 Millionen Tonnen CO₂ des Landes verursachten. Die CO₂-Emissionen der fossilen Stromerzeugung können problemlos kompensiert werden, wenn bestehende Öl- und Gaskessel durch Wärmepumpen, Holzkessel oder Sonnenkollektoren ersetzt und/oder ergänzt werden.

Die Substitution kann folgendermassen dargestellt werden. Heute wird die Raumwärme in der Schweiz gemäss Figur 5 aufbereitet.



Figur 5: Erzeugung von Nutzwärme mit den bestehenden 800'000 Öl- und 200'000 Gas-Kessel.

Effizienter ist Nutzung erneuerbarer Energien für die Heizung und allenfalls kombiniert mit fossiler Stromproduktion, wie in Figur 6 dargestellt.



Figur 6: Substitution von Öl- und Gaskessel durch Heizsysteme mit erneuerbaren Energien in Kombination mit fossiler Stromerzeugung. GuD: Gas-Kombi-Kraftwerk, WKK: Wärme-Kraft-Kopplung



Die Menge der Nutzwärme ist gleich wie diejenige der substituierten Kessel der Figur 5, aber es wird zusätzlich Strom ins Netz eingespeist. Der Brennstoff wird effizienter eingesetzt, erneuerbare Energien werden genutzt, die CO₂-Belastung wird reduziert.

Die künftige Zusammensetzung des Heizungsparks beeinflusst die netto ans Netz zusätzlich einspeisbare Strommenge. Das Prinzip der Substitution ist in Tabelle 4: Prinzip der Substitution von fossilen Heizungen durch erneuerbare Energien und fossile Stromerzeugung qualitativ dargestellt:

| Massnahmen | Wirkung auf CO₂-Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität mit Wärme-Kraft-Kopplung und Gas-Kombi-Kraftwerken | Zunahme | Starke Zunahme |
| Heizung und Warmwasser mit erneuerbaren Energien, insbesondere Wärmepumpen, Holzfeuerungen und Sonnenkollektoren statt Öl- und Gaskessel | Starke Reduktion | Reduktion |
| BILANZ | Reduktion | Zunahme |

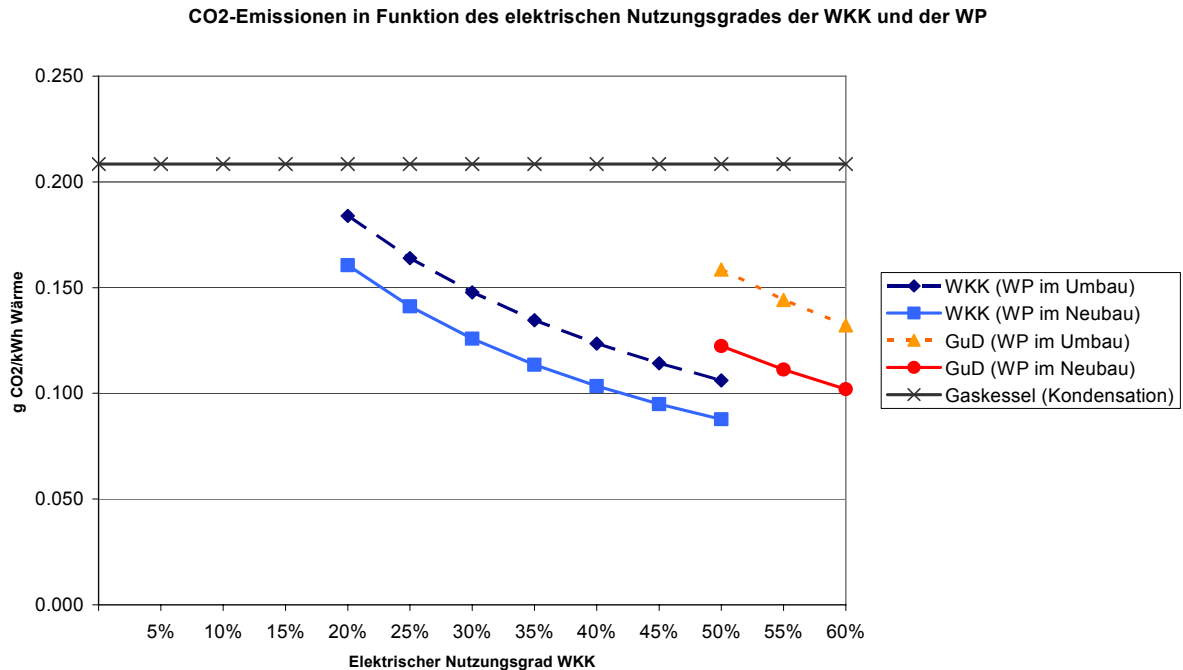
Tabelle 4: Prinzip der Substitution von fossilen Heizungen durch erneuerbare Energien und fossile Stromerzeugung

Auf die zwei effizienteren Systeme, Gas-Kombi-Kraftwerke (auch ohne Abwärmenutzung) und Wärme-Kraft-Kopplung mit voller Wärmenutzung wird nun näher eingegangen.

Die Figur 7 zeigt die CO₂-Emissionen der Erzeugung von Wärme mit elektrischen Wärmepumpen in Abhängigkeit des elektrischen Nutzungsgrades der fossilen Stromerzeugung mit beiden Systemen.

Als Referenz gilt die Heizung mit einem kondensierenden Gaskessel. Für die Heizung mit Wärmepumpen werden gemäss Feldmessungen [6] zwei Jahresarbeitszahlen betrachtet: 2.7 für den Umbau bestehender Heizungen und 3.5 für Neubauten. Diese Werte sind für zukünftige Anlagen eher konservativ.

Die Effizienz der Stromerzeugung wird für die Berechnung für die Wärme-Kraft-Kopplung von 20 bis 50% und für Gas-Kombi-Kraftwerke von 50 bis 60% verändert. Diese Werte entsprechen dem heutigen handelsüblichen Stand der Technik.



Figur 7: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des elektrischen Nutzungsgrades der Stromerzeugung. GuD: Gas-Kombi-Kraftwerk ohne externe Abwärmenutzung, WKK: Wärme-Kraft-Kopplung mit voller Wärmenutzung, WP: Wärmepumpe. Effizienz der WP 2.7 im Umbau und 3.5 im Neubau (Werte aus Feldmessungen 1995-2003).

Figur 7 zeigt, dass die Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit einem elektrischen Nutzungsgrad unter 30% keinen Vorteil gegenüber Gas-Kombi-Kraftwerken (ohne Abwärmenutzung) aufweisen. Dies entspricht einer Leistung der WKK von 100 kW elektrisch bzw. 150 kW thermisch.

Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen von 100 bis 5'000 kW thermisch – mit elektrischem Nutzungsgrad über 35% - sind in jedem Fall mindestens so gut bis leicht besser als Kombi-Kraftwerke (ohne Abwärmenutzung). Dabei wird vorausgesetzt, dass die spezifischen Stickoxyd-Emissionen (NO_x) auf das Niveau der Kessel gebracht werden. Dies ist in dieser Leistungsklasse technisch problemlos und kostenmässig realistisch. Mittlere WKK-Anlagen stellen also eine Art dritten Weg dar zusätzlich zu den sehr dezentralen Mikro-Wärme-Kraft-Kopplungen und der zentralen Produktion in sehr grossen Kraftwerken.

Die Substitution von Öl- und Gaskesseln durch effizientere Technologien und durch Nutzung erneuerbarer Energien erlaubt eine deutliche Reduktion der CO₂-Intensität, wie Tabelle 5 zeigt.



| Heizsystem | CO ₂ -Emissionen in Gramm pro kWh Nutzwärme, Stand 2007 | CO ₂ -Emissionen in % vom Ölkessel |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Ölkessel | 300 | 100% (Referenz) |
| Gaskessel | 220 | 75% |
| Wärmepumpe, Strom aus fossiler WKK | 90 bis 180 | 30 bis 60% |
| Wärmepumpe, Strom aus GuD | 100 bis 160 | 33 bis 53% |
| Holzkessel | 0 | 0% |
| Solarthermie | 0 | 0% |

Tabelle 5: CO₂-Intensität verschiedener Heizsysteme und relative Emissionen im Vergleich mit dem Ölkessel. GuD: Gas-Kombi-Kraftwerk, WKK: fossile Wärme-Kraft-Kopplung. Effizienz der WP 2.7 im Umbau und 3.5 im Neubau (Werte aus Feldmessungen 1995-2003)

Dank Nutzung erneuerbarer Energien werden die CO₂-Emissionen je nach System um 30% bis 100% reduziert.

10. Wieviele Kraftwerke sind notwendig?

Für die Substitution aller Öl- und Gaskessel durch Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, Wärmepumpen, Holzkessel und Solaranlagen sowie Verbesserung der Gebäudehülle sind zahlreiche Kombinationen möglich. Die Kombination der einzelnen Systeme in verschiedenen Leistungsklassen führt zu verschiedenen Resultaten der Reduktion des CO₂-Ausstosses und der Erhöhung der Stromproduktion.

Nachfolgend wurden fünf Varianten gerechnet.

- a) Keine CO₂-Reduktion aber Erhöhung der Stromproduktion um 50%

Anvisiert wird eine maximale Stromproduktion ohne Zunahme des CO₂-Ausstosses.

| Massnahmen | Wirkung auf CO ₂ -Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität mit 46'000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und 7 Gas-Kombi-Kraftwerken | + 14.4 mio t + 5.5 mio t | + 22.5 TWh + 15.4 TWh |
| Heizung und Warmwasser mit 800'000 Wärmepumpen, 200'000 Holzfeuerungen und Sonnenkollektoren ersetzen 1'000'000 Kessel | - 20 mio t | - 9.3 TWh |
| 200'000 Kessel bleiben in Kombination mit WKK und WP zur Deckung von Leistungsspitzen | + 0.1 mio t | 0 |
| BILANZ | Neutral | + 28.6 TWh |



b) CO₂-Reduktion von 20% und Erhöhung der Stromproduktion um 20%

Gemäss Bali-Umweltgipfel vom 2008 wird eine Reduktion des CO₂-Austosses von 20% anvisiert. Parallel wird die Stromproduktion um 20% erhöht.

| Massnahmen | Wirkung auf CO₂-Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität mit 30'000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und 2 Gas-Kombi-Kraftwerken | + 9.4 mio t + 1.6 mio t | + 14.6 TWh + 4.4 TWh |
| Heizung und Warmwasser mit 600'000 Wärmepumpen, 400'000 Holzfeuerungen und Sonnenkollektoren ersetzen 1'000'000 Kessel | - 20 mio t | - 7 TWh |
| 200'000 Kessel bleiben in Kombination mit WKK und WP zur Deckung von Leistungsspitzen | + 1 mio t | 0 |
| BILANZ | - 8 mio t | + 12 TWh |

Dieser Fall ist in der Figur 6, Seite 15, dargestellt.

c) CO₂-Reduktion von 30% und keine zusätzliche Stromproduktion

Das Pendant zu a) ist die maximale CO₂-Reduktion ohne Zunahme der Stromerzeugung.

| Massnahmen | Wirkung auf CO₂-Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität mit 13'000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen | + 4 mio t | + 6.4 TWh |
| Heizung und Warmwasser mit 500'000 Wärmepumpen, 500'000 Holzfeuerungen und Sonnenkollektoren ersetzen 1'000'000 Kessel | - 20 mio t | - 6.4 TWh |
| 240'000 Kessel bleiben in Kombination mit WKK und WP zur Deckung von Leistungsspitzen | + 4 mio t | 0 |
| BILANZ | - 12 mio t | Neutral |



Die zwei letzten Varianten sind mögliche Etappen zwischen heute und Variante b), welche wahrscheinlich schon im Jahr 2020 Realität werden.

- d) CO₂-Reduktion von 8% und keine zusätzliche Stromproduktion.

Der Strom wird ausschliesslich durch Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen erzeugt.

| Massnahmen | Wirkung auf CO₂-Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität mit 10'000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen | + 3.1 mio t | + 5 TWh |
| Heizung und Warmwasser mit 400'000 Wärmepumpen anstelle von Kesseln | - 8.2 mio t | - 5 TWh |
| 140'000 Kessel bleiben in Kombination mit WKK und WP zur Deckung von Leistungsspitzen | + 1.7 mio t | 0 |
| BILANZ | - 3.4 mio t | Neutral |

- e) CO₂-Reduktion von 8% und keine zusätzliche Stromproduktion.

Der Strom wird vorwiegend durch Gas-Kombi-Kraftwerke und wenige WKK erzeugt.

| Massnahmen | Wirkung auf CO₂-Emissionen | Wirkung auf Stromerzeugung |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Fossile Erzeugung von Elektrizität durch 1000 Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und 2 Gas-Kombi-Kraftwerke | + 0.3 mio t + 1.6 mio t | + 0.6 TWh + 4.4 TWh |
| Heizung und Warmwasser mit 400'000 Wärmepumpen anstelle von Kesseln | - 8.2 mio t | - 5.0 TWh |
| 180'000 Kessel bleiben in Kombination mit WKK und WP zur Deckung von Leistungsspitzen | + 3.2 mio t | 0 |
| BILANZ | - 3.1 mio t | Neutral |



Sind die Werte von 6 TWh bis 21TWh Strom aus WKK als erschliessbares Potential realistisch?

Ja. Gemäss Perspektiven 2005 des BFE beträgt das Potential der Elektrizität aus WKK 7,6 TWh (Szenario IV, Variante D&E) bis 17,4 TWh (Szenario III, Variante D). Szenario III, Variante D&E, kommt auf 12,1 TWh. Frühere Studien (PSI 2001, Dr. Eicher+Pauli AG 2003, Prognos AG 2003, Jochem & Jakob 2004), bekommen für das technisch-realistisch erschliessbare Potential 5TWh bis 33TWh.

Es sind zahlreiche Zusammensetzungen der verschiedenen Technologien möglich. Die obigen Beispiele zeigen die Bandbreite der Möglichkeiten, ausgehen vom Ersatz von den bestehenden 1 Million Öl- und Gaskessel.

In der Vergangenheit wurden oft zwei Thesen vertreten. Entweder die zentrale Stromproduktion mit wenigen sehr grossen Kraftwerken oder die sehr dezentrale mit ganz vielen kleinen Anlagen, praktisch in jedem Haushalt. Zwischen diesen zwei Extremen gibt es einen weiteren, dritten Weg: Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mittlerer Leistung.

Die grossen Kraftwerke wie Gas-Kombi- oder Kernkraftwerke decken die Grundlast des Netzes. Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mittlerer Leistung können diese Aufgabe auch erfüllen. Statt wenigen grossen Zentralen können viele – aber nicht unendlich viele – Einheiten den gewünschten Strom zuverlässig liefern. 4000 solche Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen erreichen eine elektrische Leistung von rund 400 MW, was einem Gas-Kombi-Kraftwerk entspricht. Beide können sich im Netz ergänzen.

Die zunehmende Rolle der Vernetzung illustriert die Informatik. Zu Beginn wurden immer leistungsstärkere, zentrale Einheiten entwickelt. Heute wird die Rechenleistung über die Verbindung von Millionen kleiner Einheiten übers Internet erhöht. So entsteht eine virtuelle Rechenmaschine, deren Leistung in einer zentralen Einheit unvorstellbar wäre.

Analog kann in Zukunft die Stromversorgung über ein virtuelles Kraftwerk erfolgen. Die schweizerische Stromwirtschaft hat diesen Ansatz der Dezentralisierung und der optimalen Zusammenspiels von verschiedenen sich ergänzenden Kraftwerkstypen in der Vergangenheit schon realisiert: Strom wird heute an rund 2700 Standorten erzeugt (nur netzgebundene Anlagen). Die Schweiz ist schon ein virtuelles Kraftwerk, welches ausgebaut und verstärkt werden kann. Somit wird das Netz optimal genutzt: die Erzeugung in der Nähe des Verbrauchers minimiert die Infrastrukturen und reduziert die Transport- und Transformations-Verluste.

WKK mittlerer Leistung passen genau in dieses vorhandene Gebilde: Sie speisen Strom nicht auf Niederspannung, sondern auf Mittelspannung ein. Sie reduzieren die Lastspitzen in der Nähe der entsprechenden Verbraucher. Das vorhandene Netz wird optimaler genutzt: so können lokale Spitzen ohne Netzverstärkung verarbeitet werden. Ferner befinden sich die WKK-Anlagen in der Nähe von Wärmeabnehmern.



11. **Abkürzungen**

| | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CCS | carbon capture and storage, Abscheidung und Speicherung von CO ₂ in geeigneten geologischen Schichten |
| g | Gramm |
| GKW | Gas-Kraftwerk |
| GuD | Gas- und Dampfkraftwerk oder Gas-Kombi-Kraftwerk |
| JAZ | Jahresarbeitszahl. Die jährliche erzeugte Heizenergie einer Wärmepumpe wird durch die jährlich verbrauchte Elektrizität dividiert. |
| kg | Kilogramm |
| KKW | Kern-Kraftwerk, wird auch Atom-Kraftwerk genannt (AKW) |
| kW | Kilo-Watt, Leistungs-Einheit, entspricht 1'000 Watt |
| kWh | Kilo-Watt-Stunde. Ist die Energie wenn eine Leistung von 1000 Watts während einer Stunde geleistet wird. |
| MW | Mega-Watt (1 million Watts) |
| T | Tonne (1000 kg) |
| TW | Tera-Watt, Leistungs-Einheit, entspricht 1'000'000'000'000 Watts oder 1 Milliarde Kilowatts. |
| TWh | Tera-Watt-Stunde. Ist die Energie, wenn eine Leistung von 1 TW Watts während einer Stunde geleistet wird. |
| WKK | Wärme-Kraft-Kopplung |
| WP | Wärmepumpe |



12. Bibliographie

- [1] Programmziele EnergieSchweiz, Sektorziele und Zielbeiträge 2001 und 2002, BFE, Bern, Februar 2004.
Daten gemäss Kap. 6.1 Seite 28, Kap. 3.4, Seite 12 und Kap. 3.3, Seite 11: Energieverbrauch fossiler Brennstoffe für Heizung und Warmwasser in Wohngebäuden und Betriebsgebäuden zusammen gezählt ergibt $223'670 + 67'413 = 291'083$ TJ oder rund 81 TWh. Ziel EnergieSchweiz für Brennstoffe, gesamt: 50'503 TJ oder 14 TWh. Ziel EnergieSchweiz für Brennstoffe, notwendiger Zielbeitrag erneuerbarer Energien: 10'800 TJ oder 3 TWh.
- [2] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2005, BFE, Bern, August 2006
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=de>
- [3] Emissionen gemäss CO2-Gesetz, BAFU
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=de>
- [4] Bundesamt für Statistik, Volkszählung 2000, Kennzahlen von Gebäuden und Wohnungen, aus www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/bau-_und_wohnungswesen.
- [5] Die Wärme-Kraft-Kopplung im Programm EnergieSchweiz, BFE, August 2003 (Dok.-ID 003692950)
- [6] M. Ehrbar, M. Erb, P. Hubacher, Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003, Schlussbericht, April 2004, ENET 240016
- [7] P. Hofer, A. Kirchner, M. Wunsch (Prognos), HU. Schärer (BFE), Energieperspektiven, Exkurs 16: Wärmepumpen und Strombedarf zur Wärmeerzeugung, Bern, Januar 2007
- [8] F. Rognon, Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung, BFE, Bern, Juni 2005
- [9] F. Rognon, Förderung der erneuerbaren Energien durch das Bundesamt für Energie: Ziele für Wärmepumpen und Umfeld für grosse Wärmepumpen, im Tagungsband der 9. UAW-Tagung vom 2002, ENET-Nr. 220358.
- [10] M. Zogg, Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, BFE, Mai 2002
- [11] R. Dettli, M. Baur, D. Philippen, M. Kernen, Potential erneuerbarer Energien in grösseren fossilen Feuerungen, BFE, Bern, Januar 2007
- [12] VDI-Berichte Nr. 1495, 1999, Seiten 95-111 und 1594, 2001, Seiten 99-112.
- [13] IEA heat pump programme, Heat pumps can cut global CO2 emissions by nearly 8%, heat pump centre, Boras, 2008
- [14] Heat Pump & Thermal Storage technology Center of Japan, Heat Pumps long awaited way out of the global warming, The Denki Shimbun, Tokyo, 2007 (www.hptcj.or.jp)



13. **Annahmen**

- Die Berechnung sind Potentiale und keine Prognosen.
- In den Berechnungen wurden zwecks Vereinfachung die energetischen Beiträge von Sonnenkollektoren und Verbesserung der Gebäudehülle nicht berücksichtigt. So liegen die berechneten Werte auf der konservativen Seite.
- Für die Wahl der durchschnittlichen Heizleistungen von Wärmepumpen und Holzkessel wurden Potentialstudien und Perspektiven 2005 des BFE betrachtet. Die angenommenen durchschnittlichen Leistungen liegen 15 bis 50% unter dem Schnitt der bestehenden Kessel. Grund: Wärmepumpen werden bei grösseren Objekten bivalent mit Kessel betrieben.
- Für die Wahl der durchschnittlichen Heizleistung der Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen wurde die Potentialstudien [7], [8], [10] und [11] betrachtet.
- Die meisten WKK-Anlagen werden bivalent mit Kessel betrieben d.h. sie decken die Wärme-Bandlast und der Kessel deckt die Spitzen. Daher sind 3500 Betriebsstunden im Jahr angenommen.
- Massgebend für die maximale Anzahl der Wärmepumpen, Holzkessel und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen ist die erzeugte Heizenergie. Sie darf nicht höher sein, als diejenige der substituierten Kessel. Dies begrenzt vor allem die Anzahl der WKK.
- Die durchschnittliche Heizleistung von Wärmepumpen und Holzkessel und WKK darf nicht höher liegen als diejenige der substituierten Kessel.
- Die angenommenen jährlichen Effizienzen sind konservativ angenommen, insbesondere bei den Wärmepumpen. Grund: es geht vorwiegend um Sanierungen bestehender Heizungen, ohne wesentliche Änderung der Gebäudehülle oder des Wärmeverteilsystems.
- Die Dimensionierung aller Heizsysteme erfolgt nach SIA-Norm, d.h. der Wärmeerzeuger deckt den ganzen Heizleistungsbedarf bis Auslegepunkt (typisch für Mittelland ist -8°C). Bei tieferen Temperaturen entsteht eine Unterdeckung d.h. die Temperatur im Gebäude liegt tiefer als 20°C . Es wird keine andere Heizung eingesetzt. Erfahrung zeigt aber, dass nach Norm ausgelegte Heizsysteme den ganzen Bedarf bis -10°C decken (die Berechnung nach Norm steht auf der sicheren Seite).
- Bei den Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen wird die Einhaltung der LRV92 vorausgesetzt d.h. NOx-Grenzwert wie für Heizkessel.
- Bei Gas-Kombi-Kraftwerken sind die angenommen 5000 Stunden im Jahr Voll-Last-Stunden.



14. Berechnungen

Variante a) Keine CO₂-Reduktion aber Erhöhung der Stromproduktion um 50%

| Eingabe: | | grau hinterlegte Felder | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|----------------|--|--|
| Für eine Anlage | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| Anlagentyp | Heizleistung (kW) | Betriebsstunden pro Jahr h/a | Heizenergie [1]*[8] (kWh pro Jahr) | CO ₂ -Emissionen (Gas 0.198, Oel EL 0.263) kgCO ₂ /kWh | CO ₂ -Emission [3]*[4] (t pro Jahr) | Nutzungsgrad jährlich | Elektrische Leistung [1]/[6] (kW) | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [7]*[2] | | | |
| WP | 20.0 | 1800 | 36000 | 0.000 | 0 | 3.10 | -6.45 | -11613 | | | |
| Holzessel | 35.0 | 1800 | 63000 | 0.000 | 0 | 0.90 | 0 | 0 | | | |
| WKK | 200 | 3500 | 700000 | 0.224 | 314 | 0.35 | 140 | 490000 | | | |
| GuD | 0 | 5500 | 0 | 0.198 | 792000 | 0.55 | 400000 | 2200000000 | | | |
| Kessel | 41 | 1800 | 73800 | 0.250 | 21 | 0.90 | | | | | |
| WKK, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 60% Gas- und 40% Oel-WKK | | | | CO ₂ -Austoss der ganzen CH | | | | 41000000 | mio t pro Jahr | | |
| Kessel, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 20% Gas- und 80% Oelkessel | | | | Stromverbrauch der ganzen CH | | | | 57.4 | TWh | | |
| Für mehrere Anlagen: | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | | | |
| | Anzahl | Heizleistung [1]*[10] (kW) | Heizenergie [3]*[10] (kWh pro Jahr) | CO ₂ -Emissionen (t pro Jahr) | Elektrische Leistung [7]*[10] (kW) | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [8]*[10] | | | | | |
| Bedarf heute | 1'000'000 | 41'000'000 | 73'800'000'000 | 20'500'000 | 0 | 0 | | | | | |
| SUBSTITUTION: | | | | | | | | | | | |
| WP | 800'000 | 16'000'000 | 28'800'000'000 | 0 | -5'161'290 | -9'290'322'581 | | | | | |
| Holzessel | 200'000 | 7'000'000 | 12'600'000'000 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| WKK | 46'000 | 9'200'000 | 32'200'000'000 | 14'425'600 | 6'440'000 | 22'540'000'000 | | | | | |
| GuD | 7 | 0 | 0 | 5'544'000 | 2'800'000 | 15'400'000'000 | | | | | |
| Summe der Substitutionen | | 32'200'000 | 73'600'000'000 | 19'969'600 | 4'078'710 | 28'649'677'419 | | | | | |
| Spitzenkessel | 214'634 | 8'800'000 | 200'000'000 | 50'000 | 4'078'710 | 28'649'677'419 | | | | | |
| Reduktion nach Substitution | | 0 | 0 | -480'400 | | | | | | | |
| In % des ganzen Landes | | | | -1.2% | | 49.9% | | | | | |
| Durchschnittliche Heizleistung WP Holz_WKK | | | 31 | kW | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | 92.6 | TWh | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | 333.4 | PJ | | | | | | | |
| Brennstoff-Input Gaskessel vor Substitution | | | 82.0 | TWh | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+Spitzenkessel | | | 295.2 | PJ | | | | | | | |
| Strom ans Netz durch Brennstoff-Input | | | 31.01% | | | | | | | | |



Variante b) CO₂-Reduktion von 20% und Erhöhung der Stromproduktion um 20%

| Eingabe: | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | |
|--------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------|------------|----------------------------|-----------|----------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|--|---------------------------------------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------------------------|--|
| Für eine Anlage | | Heizleistung (kW) | | Betriebsstunde n pro Jahr | | Heizenergie [1]*[8] h/a (kWh pro Jahr) | | Spezifische CO ₂ -Emissionen (Gas 0.198, Oel EL 0.263) kgCO ₂ /kWh | | CO ₂ -Emission [3]*[4] (t pro Jahr) | | Nutzungsgrad jährlich | | Elektrische Leistung [1]/[6] (kW) | | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [7]*[2] | |
| WP | | 20.0 | 1800 | 36000 | 0.000 | 0 | 3.10 | -6.45 | -11613 | | | | | | | | |
| Holzessel | | 35.0 | 1800 | 63000 | 0.000 | 0 | 0.90 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| WKK | | 200 | 3500 | 700000 | 0.224 | 314 | 0.35 | 140 | 490000 | | | | | | | | |
| GuD | | 0 | 5500 | 0 | 0.198 | 792000 | 0.55 | 400000 | 2200000000 | | | | | | | | |
| Kessel | | 41 | 1800 | 73800 | 0.250 | 21 | 0.90 | | | | | | | | | | |
| WKK, spezifische CO ₂ - Emissionen: aus 60% Gas- und 40% Oel-WKK | | | | | | | | | | CO ₂ -Austoss der ganzen CH | | 41000000 | | mio t pro Jahr | | | |
| Kessel, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 20%Gas- und 80% Oelkessel | | | | | | | | | | Stromverbrauch der ganzen CH | | 57.4 | | TWh | | | |
| Für mehrere Anlagen: | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | 15 | | | | | |
| | | Anzahl | | Heizleistung [1]*[10] (kW) | | Heizenergie [3]*[10] (kWh pro Jahr) | | CO ₂ -Emissionen (t pro Jahr) | | Elektrische Leistung [7]*[10] (kW) | | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [8]*[10] | | | | | |
| Bedarf heute | | 1'000'000 | | 41'000'000 | | 73'800'000'000 | | 20'500'000 | | 0 | | 0 | | | | | |
| SUBSTITUTION: | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WP | | 600'000 | 12'000'000 | 21'600'000'000 | 0 | -3'870'968 | -6'967'741'935 | | | | | | | | | | |
| Holzessel | | 400'000 | 14'000'000 | 25'200'000'000 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| WKK | | 30'000 | 6'000'000 | 21'000'000'000 | 9'408'000 | 4'200'000 | 14'700'000'000 | | | | | | | | | | |
| GuD | | 2 | 0 | 0 | 1'584'000 | 800'000 | 4'400'000'000 | | | | | | | | | | |
| Summe der Substitutionen | | | | 32'000'000 | | 67'800'000'000 | | 10'992'000 | | 1'129'032 | | 12'132'258'065 | | | | | |
| Spitzenkessel | | 219'512 | | 9'000'000 | | 6'000'000'000 | | 1'500'000 | | | | | | | | | |
| Reduktion nach Substitution | | | | 0 | | 0 | | -8'008'000 | | 1'129'032 | | 12'132'258'065 | | | | | |
| In % des ganzen Landes | | | | | | | | -19.5% | | | | 21.1% | | | | | |
| Durchschnittliche Heizleistung WP Holz WKK 31 kW | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel 56.7 TWh | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel 204.0 PJ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input Gaskessel vor Substitution 82.0 TWh | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+Spitzenkessel 295.2 PJ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Strom ans Netz durch Brennstoff-Input 24.26% | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Variante c) CO₂-Reduktion von 30% und keine zusätzliche Stromproduktion

| Eingabe: grau hinterlegte Felder | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Für eine Anlage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Anlagentyp | Heizleistung (kW) | Betriebsstunde n pro Jahr h/a | Heizenergie (kWh pro Jahr) [1]*[8] | Spezifische CO ₂ -Emissionen (Gas 0.198, Oel EL 0.263) kgCO ₂ /kWh | CO ₂ -Emission (t pro Jahr) [3]*[4] | Nutzungsgrad jährlich | Elektrische Leistung (kW) [1]/[6] | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [7]*[2] |
| WP | 22.0 | 1800 | 39600 | 0.000 | 0 | 3.10 | -7.10 | -12774 |
| Holzessel | 35.0 | 1800 | 63000 | 0.000 | 0 | 0.90 | 0 | 0 |
| WKK | 200 | 3500 | 700000 | 0.224 | 314 | 0.35 | 140 | 490000 |
| GuD | 0 | 5500 | 0 | 0.198 | 792000 | 0.55 | 400000 | 2200000000 |
| Kessel | 41 | 1800 | 73800 | 0.250 | 21 | 0.90 | | |
| WKK, spezifische CO ₂ - Emissionen: aus 60% Gas- und 40% Oel-WKK | | | | CO ₂ -Austoss der ganzen CH | | 41000000 | | mio t pro Jahr |
| Kessel, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 20% Gas- und 80% Oelkessel | | | | Stromverbrauch der ganzen CH | | 57.4 | | TWh |
| Für mehrere Anlagen: | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | |
| | Anzahl | Heizleistung [1]*[10] (kW) | Heizenergie [3]*[10] (kWh pro Jahr) | CO ₂ -Emissionen (t pro Jahr) | Elektrische Leistung [7]*[10] (kW) | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [8]*[10] | | |
| Bedarf heute | 1'000'000 | 41'000'000 | 73'800'000'000 | 20'500'000 | 0 | 0 | | |
| SUBSTITUTION: | | | | | | | | |
| WP | 500'000 | 11'000'000 | 19'800'000'000 | 0 | -3'548'387 | -6'387'096'774 | | |
| Holzessel | 500'000 | 17'500'000 | 31'500'000'000 | 0 | 0 | 0 | | |
| WKK | 13'000 | 2'600'000 | 9'100'000'000 | 4'076'800 | 1'820'000 | 6'370'000'000 | | |
| GuD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| Summe der Substitutionen | | 31'100'000 | 60'400'000'000 | 4'076'800 | -1'728'387 | -17'096'774 | | |
| Spitzenkessel | 241'463 | 9'900'000 | 13'400'000'000 | 3'350'000 | | | | |
| Reduktion nach Substitution | | 0 | 0 | -13'073'200 | -1'728'387 | -17'096'774 | | |
| In % des ganzen Landes | | | | -31.9% | | 0.0% | | |
| Durchschnittliche Heizleistung WP_Holz_WKK 31 kW | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | 33.1 | TWh | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | 119.1 | PJ | | | | |
| Brennstoff_Input Gaskessel vor Substitution | | | 82.0 | TWh | | | | |
| Brennstoff_Input WKK+Spitzenkessel | | | 295.2 | PJ | | | | |
| Strom ans Netz durch Brennstoff-Input | | | | -0.09% | | | | |



Variante d) CO₂-Reduktion von 8% und keine zusätzliche Stromproduktion

| Eingabe: | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------|---------------|-------------------------------|-----------|-------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|--|---------------------------------------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------------------------|--|
| Für eine Anlage | | Heizleistung (kW) | | Betriebsstunde n pro Jahr h/a | | Heizenergie [1]*[8] (kWh pro Jahr) | | Spezifische CO ₂ -Emissionen (Gas 0.198, Oel EL 0.263) [3]*[4] (kgCO ₂ /kWh) | | CO ₂ -Emission [3]*[4] (t pro Jahr) | | Nutzungsgrad jährlich | | Elektrische Leistung [1]/[6] (kW) | | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [7]*[2] | |
| WP | | 22.0 | 1800 | 39600 | 0.000 | 0 | 3.10 | -7.10 | -12774 | | | | | | | | |
| Holzessel | | 35.0 | 1800 | 63000 | 0.000 | 0 | 0.90 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| WKK | | 200 | 3500 | 700000 | 0.224 | 314 | 0.35 | 140 | 490000 | | | | | | | | |
| GuD | | 0 | 5500 | 0 | 0.198 | 792000 | 0.55 | 400000 | 2200000000 | | | | | | | | |
| Kessel | | 41 | 1800 | 73800 | 0.250 | 21 | 0.90 | | | | | | | | | | |
| WKK, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 60% Gas- und 40% Oel-WKK | | | | | | | | | | CO ₂ -Austoss der ganzen CH | | 41000000 | | mio t pro Jahr | | | |
| Kessel, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 20% Gas- und 80% Oelkessel | | | | | | | | | | Stromverbrauch der ganzen CH | | 57.4 | | TWh | | | |
| Für mehrere Anlagen: | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | 15 | | | | | |
| | | Anzahl | | Heizleistung [1]*[10] (kW) | | Heizenergie [3]*[10] (kWh pro Jahr) | | CO ₂ -Emissionen (t pro Jahr) | | Elektrische Leistung [7]*[10] (kW) | | Elektrische Energie pro Jahr (kWh) [8]*[10] | | | | | |
| Bedarf heute | | 400'000 | | 16'400'000 | | 29'520'000'000 | | 8'200'000 | | 0 | | 0 | | | | | |
| SUBSTITUTION: | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WP | 0% | 400'000 | 8'800'000 | 15'840'000'000 | 0 | -2'838'710 | -5'109'677'419 | | | | | | | | | | |
| Holzessel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| WKK | 10'000 | 2'000'000 | 7'000'000'000 | 3'136'000 | 1'400'000 | 4'900'000'000 | | | | | | | | | | | |
| GuD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | |
| Summe der Substitutionen | | 10'800'000 | | 22'840'000'000 | | 3'136'000 | | -1'438'710 | | -209'677'419 | | | | | | | |
| Spitzenkessel | | 136'585 | | 5'600'000 | | 6'680'000'000 | | 1'670'000 | | | | | | | | | |
| Reduktion nach Substitution | | 0 | | 0 | | -3'394'000 | | -1'438'710 | | -209'677'419 | | | | | | | |
| In % des ganzen Landes | | | | | | -8.3% | | | | -0.4% | | | | | | | |
| Durchschnittliche Heizleistung WP Holz WKK | | | | 26 | | kW | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | | 21.4 | | TWh | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | | | 77.1 | | PJ | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input Gaskessel vor Substitution | | | | 32.8 | | TWh | | | | | | | | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+Spitzenkessel | | | | 118.1 | | PJ | | | | | | | | | | | |
| Strom ans Netz durch Brennstoff-Input | | | | | | -1.50% | | | | | | | | | | | |



Variante e) CO₂-Reduktion von 8% und keine zusätzliche Stromproduktion

| Eingabe: grau hinterlegte Felder | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Für eine Anlage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Anlagentyp | Heizleistung (kW) | Betriebsstunde n pro Jahr h/a | Heizenergie [1]*[8] (kWh pro Jahr) | Spezifische CO ₂ -Emissionen (Gas 0.198, Oel EL 0.263) kgCO ₂ /kWh | CO ₂ -Emission [3]*[4] (t pro Jahr) | Nutzungsgrad jährlich | Elektrische Leistung [1]/[6] (kW) | Elektrische Energie pro Jahr [7]*[2] (kWh) |
| WP | 22.0 | 1800 | 39600 | 0.000 | 0 | 3.10 | -7.10 | -12774 |
| Holzessel | 35.0 | 1800 | 63000 | 0.000 | 0 | 0.90 | 0 | 0 |
| WKK | 200 | 3500 | 700000 | 0.224 | 314 | 0.35 | 140 | 490000 |
| GuD | 0 | 5500 | 0 | 0.198 | 792000 | 0.55 | 400000 | 2200000000 |
| Kessel | 41 | 1800 | 73800 | 0.250 | 21 | 0.90 | | |
| WKK, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 60% Gas- und 40% Oel-WKK | | | | CO ₂ -Austoss der ganzen CH | | 4100000 | | mio t pro Jahr |
| Kessel, spezifische CO ₂ -Emissionen: aus 20% Gas- und 80% Oelkessel | | | | Stromverbrauch der ganzen CH | | 57.4 | | TWh |
| Für mehrere Anlagen: | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | |
| Bedarf heute | Anzahl | Heizleistung [1]*[10] (kW) | Heizenergie [3]*[10] (kWh pro Jahr) | CO ₂ -Emissionen (t pro Jahr) | Elektrische Leistung [7]*[10] (kW) | Elektrische Energie pro Jahr [8]*[10] (kWh) | | |
| Bedarf heute | 400'000 | 16'400'000 | 29'520'000'000 | 8'200'000 | 0 | 0 | | |
| SUBSTITUTION: | | | | | | | | |
| Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion) | 0% | 0 | 0 | 0 | | | | |
| WP | 400'000 | 8'800'000 | 15'840'000'000 | 0 | -2'838'710 | -5'109'677'419 | | |
| Holzessel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| WKK | 1'000 | 200'000 | 700'000'000 | 313'600 | 140'000 | 490'000'000 | | |
| GuD | 2 | 0 | 0 | 1'584'000 | 800'000 | 4'400'000'000 | | |
| Summe der Substitutionen | | 9'000'000 | 16'540'000'000 | 1'897'600 | -1'898'710 | -219'677'419 | | |
| Spitzenkessel | 180'488 | 7'400'000 | 12'980'000'000 | 3'245'000 | | | | |
| Reduktion nach Substitution | | 0 | 0 | -3'057'400 | -1'898'710 | -219'677'419 | | |
| In % des ganzen Landes | | | | -7.5% | | -0.4% | | |
| Durchschnittliche Heizleistung WP_Holz_WKK | | 22 | | kW | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | 23.8 | | TWh | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+GuD+Spitzenkessel | | 85.8 | | PJ | | | | |
| Brennstoff-Input Gaskessel vor Substitution | | 32.8 | | TWh | | | | |
| Brennstoff-Input WKK+Spitzenkessel | | 118.1 | | PJ | | | | |
| Strom ans Netz durch Brennstoff-Input | | | | -2.34% | | | | |