

Schlussbericht, Juni 2005

Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung

Für maximale CO₂-Reduktion
und für fossile Stromerzeugung
mit CO₂-Reduktion in der Schweiz

Auftraggeber:

Leitung der Sektion erneuerbare Energien, Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Autor:

BFE, F. Rognon, Bereichsleiter Umgebungswärme, WKK; Kälte

Begleitgruppe:

Begleitgruppe des Bereiches Umgebungswärme, WKK, Kälte

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • Medien/Dokumentation: Tel. 031 323 22 44, Fax 031 323 25 10
office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung.....	7
3. Energetische Potenziale.....	8
3.1. Theoretisches Potenzial.....	8
3.2. Technisches Potenzial.....	8
3.3. Wirtschaftliches Potenzial.....	9
3.4. Erschliessbares Potenzial.....	10
3.5. Bereitstellung des Antriebsstromes für das erschliessbare Potenzial	11
4. Potenzial der maximalen Reduktion der CO₂-Emissionen	15
5. Potenziale der fossilen Stromerzeugung mit 0% bis 10% Reduktion vom CO₂.....	17
5.1. Potenzial der fossilen Stromerzeugung mit 10% Reduktion der CO₂-Emissionen	18
5.2. Potenzial der fossilen Stromerzeugung mit Stagnation der CO₂-Emissionen	19
6. Kommentare/Erläuterungen zu den Annahmen	21
7. Referenzen.....	25
8. Verzeichnis der Abkürzungen	27
9. Verzeichnis der Figuren und Tabellen	28
10. Beilagen.....	29
10.1. Berechnung der Anzahl Anlagen bis 2050.	29
10.2. Übersicht Heizungsmarkt 2000 und 2003.....	34
10.3. Übersicht Energieträger der Heizungen in Gebäuden aus der Volkszählung 2000.	34
10.4. Detailberechnungen für Kapitel 5.	35

1. Zusammenfassung

In der Schweiz wird Wärme tiefer Temperatur für Raumwärme und Aufbereitung von Warmwasser zu 80% durch Verbrennung von Brennstoffen erzeugt. Im 2000 waren in der Schweiz eine Million Gas- und Oel-Kessel in Betrieb, welche etwa die Hälfte der 41.1 Million Tonnen CO₂ des Landes verursachten.

Dafür gibt es aber eine effizientere Lösung: die Wärmepumpe. Sie nutzt erneuerbare Energie aus der Umwelt (Erdreich, Grundwasser, See- und Flusswasser, Aussenluft) und bringt sie auf ein nutzbares Niveau. Die Wärmequelle wird ständig durch Sonneneinstrahlung, Niederschläge und Geothermie erneuert.

Mit dem enormen Potenzial unserer Umgebung kann aus heutiger Sicht die Hälfte aller Kessel durch Wärmepumpen ersetzt werden. Das entspricht 90PJ/a Nutzwärme bzw. 500'000 Anlagen.



Fig. 1: Energiefluss von fossil betriebenen Kesseln

Der Antriebsstrom für Wärmepumpen kommt aus dem Ersatz von Elektroheizungen und aus dem Ersatz von Heizkesseln durch Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit voller Wärmenutzung. Der gesamte notwendige Antriebsstrom kann somit ohne Bau neuer Stromproduktionsanlagen freigestellt werden.

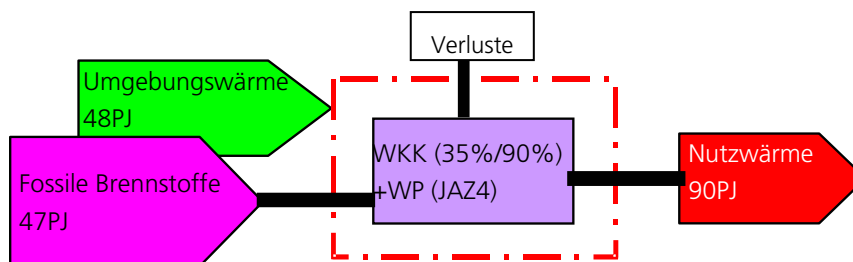


Fig. 2: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

Mit Strom aus Wärme-Kraft-Kopplung werden Brennstoff-Einsatz und CO₂-Emissionen halbiert. Bezogen auf die gesamten Emissionen der Schweiz für Brennstoffe von 24,3 Million Tonnen CO₂ beträgt die Reduktion 5 Million Tonnen CO₂ oder 21% des heutigen Ausstosses.

Der Antriebsstrom kann auch aus neuen Kombi-Kraftwerken (KK) kommen, auch ohne Wärmenutzung. Die Brennstoff- und Schadstoff-Reduktion sind in diesem Fall grösser als bei konventioneller WKK. Mit Teil- oder Vollwärmenutzung der KK sind sie noch besser.

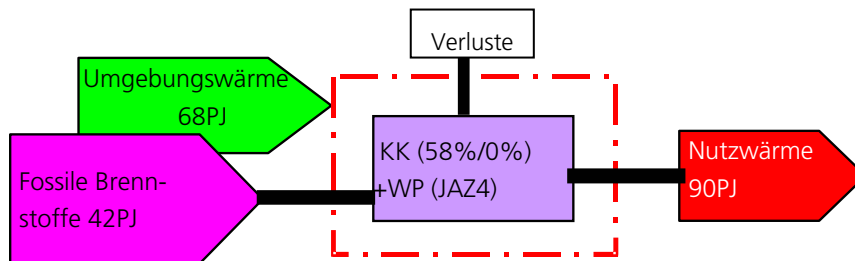


Fig. 3: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(en): der ganze Strom treibt Wärmepumpen an.

Weitere Möglichkeit: CO₂-Emissionen konstant halten und zugleich trotzdem fossilen Strom erzeugen. Die beim Ersatz von Oel- und Gaskesseln eliminierten CO₂-Mengen werden als Kompensation für die Erzeugung von fossilem Strom genutzt.

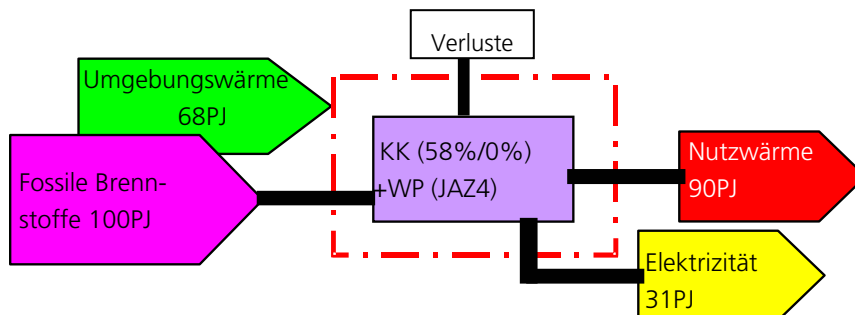


Fig. 4: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(en): 42% des Stromes treibt Wärmepumpen an.

Die CO₂-Emissionen bleiben gleich, es werden 31PJ/a oder 8,6TWh/a Strom erzeugt, was 15% des Landesverbrauches 2004 entspricht.

Die energetischen Potenziale und die Reduktion der CO₂-Emissionen sehen folgendermassen aus:

Potenziale (Zahlen gerundet!)	Technisch (was Technik kann)	Erschliessbar (was der Markt aufnehmen kann)	
		2050	bis 2010
Energie aus Umwelt (PJ/a)	176	72	10
Beitrag an Ziele von EnergieSchweiz (%)	1630%	712%	93%
Erzeugte Nutzwärme (PJ/a)	220	90	14.4
Anteil an Nutzwärme CH	80%	33%	7%
CO ₂ -Reduktion, netto (t)	12'200'000	5'000'000	800'000
Beitrag an CO ₂ -Reduktion von Brennstoffen (%)	50%	21%	3%
Beitrag an CO ₂ -Reduktion der ganzen Schweiz (%)	30%	12%	2%

Tabelle 1: Potenziale der Umgebungswärme und der daraus erzeugbaren Nutzwärme mittels Wärmepumpen. Bei der CO₂-Reduktion ist die Aufbereitung des Antriebsstroms berücksichtigt.

Umgerechnet in Stückzahlen (die angegebenen Werte sind Potenziale, nicht Ziele!):

Potenziale (Zahlen gerundet!)	wirtschaftlich realisierbar	
	2050	bis 2010
Potenzielle Anzahl WP pro Jahr	40'000	15'000
Potenzieller Marktanteil im Jahr	80%	30%
Potenzielle Anzahl WP kumuliert	500'000	130'000
Potenzieller Anteil im ganzen Heizungspark CH	50%	13%

Tabelle 2: Potenziale der Umgebungswärme und der daraus erzeugbaren Nutzwärme mittels Wärmepumpen, umgerechnet in Stückzahlen. Bei der CO₂-Reduktion ist die Aufbereitung des Antriebsstroms berücksichtigt.

2. Einleitung

Das Potenzial der Umgebungswärmenutzung zur Nutzwärmeerzeugung durch Wärmepumpen wurde schon lange nicht mehr aktualisiert [6] oder nur am Rande umfassender Studien betrachtet [9], [10]. Nachfolgend werden die neusten Erkenntnisse aus dem Markt, aus der Technik und aus der Wissenschaft berücksichtigt. Das Potenzial der CO₂-Reduktion wird in diesem Zusammenhang auch behandelt.

Die CO₂-Emissionen in der Schweiz werden zur Hälfte durch Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser verursacht, etwa ein Drittel durch den Verkehr. Die Substitution durch andere Technologien ist heute und sofort möglich. Für jede Heizungsanlage gibt es heute auf dem Markt andere Lösungen als Kessel. Nachfolgend wird der Einsatz von Wärmepumpen für Heizzwecke oder Aufbereitung von Warmwasser betrachtet.

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz eine Million Gas- und Oel-Kessel in Betrieb, welche etwa die Hälfte der 41.1 Million Tonnen CO₂ des Landes verursachten. Wie in Kap. 3 gezeigt wird, entspricht das durch Wärmepumpen erschliessbare Potenzial von 90PJ/a etwa 500'000 Kesseln.



Fig. 5: Energiefluss fossil betriebener Kessel

Vermerk: nachfolgend sind die Größenordnungen der angegebenen und geschätzten Werte wichtig. Es geht hier um Petajoule (PJ), Tera- und Giga-Watt-Stunden (TWh und GWh). Die Definitionen der verschiedenen Potenziale nehmen wir aus [15]. Neu gegenüber früheren Publikationen ist der Versuch, alle Energiemengen in Stückzahlen auszudrücken. Auch dabei besteht kein Anspruch auf absolute Genauigkeit. Ziel ist einfach, die abstrakten, enormen Zahlen greifbar zu machen.

Da es um Potenzialbetrachtungen geht, gibt es im Gegensatz zu den Perspektiven keinen festen Zeithorizont. Das Potenzial als solches bleibt vorhanden, solange der Bedarf für Raumwärme und Warmwasser vorhanden ist. Potenziale sind auch keine Ziele: sie zeigen, was möglich wäre und nicht was sein muss.

3. Energetische Potenziale

3.1. Theoretisches Potenzial

Darunter verstehen wir die absolute Obergrenze, d.h. die nach den physikalischen Gesetzmässigkeiten grundsätzlich angebotene Energie. Gemäss [7] beträgt das Potenzial an Umgebungswärme 43'300GWh/a, was 156PJ/a entspricht. Dabei ist aber zu vermerken, dass die Wärmequelle Luft – die grösste - nicht berücksichtigt ist und dass die Wärmequelle Erdwärmesonden sehr konservativ betrachtet wurde.

Wir dürfen aber nur die unmittelbar verfügbaren Wärmequellen weiter in Betracht ziehen. In [21] und [9] wurde die Verfügbarkeit von allen Wärmequellen (Erdreich, Grundwasser, Oberflächengewässer und Abwärme) in der Nähe von Verbrauchern, aber ohne die Aussenluft analysiert. Die Potenziale betragen 107TJ für Oberflächengewässer, 18PJ/a für Grundwasser, 18PJ/a für untiefe Geothermie (heute noch nicht genutzt), 26PJ/a für Abwasser aus ARA. Das Potenzial an Umgebungswärme (Erdwärme, Grundwasser, Oberflächengewässer, Abwasser) beträgt somit 169PJ/a.

Dazu kommt die Wärmequelle Luft, welche überall vorhanden und verfügbar ist. Bei der Nutzung der Energie aus der Umgebungsluft geht es eigentlich um eine indirekte Nutzung der angefallenen Sonnenenergie. Das Potenzial ist also mindestens so gross, wie dasjenige der Sonnenenergie im gebauten Raum (siehe auch [22]), welches über 300PJ/a beträgt.

Insgesamt stehen also über 469PJ/a Umgebungswärme zur Verfügung, was über 1'800PJ Nutzwärme entspricht. Um die ganze Schweiz zu beheizen, wären „nur“ 240PJ/a notwendig. Es hat also mehr als genug Umgebungswärme, um die ganze Schweiz mehrmals zu beheizen!

3.2. Technisches Potenzial

Das technische Potenzial beschreibt denjenigen Teil des theoretischen Potentials, der unter Zugrundelegung des technischen Entwicklungsstandes, aber auch unter Berücksichtigung der geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen (z.B. Natur- und Denkmalschutzbestimmungen) erschlossen werden kann. Sowohl der Stand der Technik und auch die Gesetzeslage sind dabei Variablen, die sich im Laufe der Zeit ändern können.

Den Bedarf an Nutzwärme entnehmen wir aus [1] und [2]. Betrachtungen: technisch können Wärmepumpen nahezu jedes vorhandene Heizsystem ersetzen. Einzige Begrenzung bilden die grossen Heizzentralen mit Vorlauftemperaturen über 65°C. Eine Untersuchung der EPFL [23] ergab, dass rund 80% der bestehenden Heizungen rein technisch mit Wärmepumpen betrieben werden könnten. In der Zeitspanne 2008-2010 absehbar ist die Einführung einer neuen Generation von Wärmepumpen mit dem Kältemittel CO₂, welche Vorlauftemperaturen von 70°C

bis 90°C erlauben. Eine andere bekannte WP-Technologie erlebt eine Wiedergeburt: die gasbetriebenen WP, auf Basis Absorption oder Gasmotor. Diese erreichen im Normalfall auch Vorlauftemperaturen von 70°C bis 90°C. Die meisten Produkte befinden sich in der Leistungsklasse 30 bis 100kW_{th}, welche im Neubau wie im Sanierungsmarkt sehr wichtig ist (kleine MFH, siehe [8]). Das technische Einsatzpotenzial von Wärmepumpen wird also ab 2006-2008 deutlich zunehmen.

Gemäss [1], Kap. 6.1, Seite 28, beträgt der Energieverbrauch fossiler Brennstoffe für Heizung (Raumwärme) und Warmwasser-Aufbereitung (WW) in Wohngebäuden und Betriebsgebäuden 223.670 + 67.413 = 291.083 PJ/a. Aus[19], Seite 27 und[20], Seite 16 beträgt der Nutzwärmeverbrauch für Raumheizung und Warmwasser 198.8PJ/a für Haushalte und 65.0PJ/a für Dienstleistungen und Landwirtschaft, also insgesamt 263.8PJ/a.

Wir nehmen an, dass 80% davon für Heizung und WW verbraucht werden (d.h. maximal 80°C, keine Dampferzeugung, keine Prozesswärme) und erhalten 233PJ/a bzw. 211PJ/a. Dies ist plausibel: in [3] werden für Raumwärme 222PJ/a geschätzt.

Schlussfolgerung: das Potenzial an Nutzwärme (Heizung und Warmwasser) für Wärmepumpen beträgt 220PJ/a.

3.3. Wirtschaftliches Potenzial

Das wirtschaftliche Potenzial ist derjenige Teil des technischen Potenziales, der unter Berücksichtigung der aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen interessant ist. Hier wird bewusst keine umfassende Perspektivarbeit ausgeführt. Wir nehmen einfach an, dass sich die Energiepreise nicht wesentlich verändern, d.h. 100kg Oel kosten CHF 50 bis 70.- und der allfällige Klimarappen und/oder eine leichte CO₂-Abgabe keinen spürbaren Einfluss auf die Preise haben werden.

Der Wärmemarkt ist ein Verdrängungsmarkt: wenn die Branche mehr Wärmepumpen erzeugt/vertreibt/installiert, dann wird sie weniger Oel- oder Gaskessel erzeugen/vertreiben/installieren. Das mögliche maximale Wachstum ist durch strukturelle Gegebenheiten wie Produktionskapazitäten begrenzt. Die heute bestehenden Kapazitäten für die jährlich installierten 40'000 bis 50'000 Oel- und Gaskessel können sehr rasch und mit winzigen Kostenfolgen auf Wärmepumpen "umsteigen" (abgeleitet aus der Statistik des Verbandes der Kesselhersteller Procal).

Angenommen wird also, dass die Preise von Wärmepumpen-Anlagen in den Segmenten Heizungssanierung und grosse Anlagen eine ähnliche Entwicklung erleben werden wie die Wärmepumpen für Neubauten unter 50kW_{th} in den vergangenen Jahren. Die mit Erhöhung der Stückzahlen resultierende Kostensenkungen werden in Zukunft ähnlich wie in den Jahren 1993-2005 weiter verlaufen und somit die Erschliessung weiterer Marktsegmente erlauben.

Angenommen wird, dass die technischen Fortschritte gemäss Kapitel 6, Abschnitt JAZ, die Erschliessung nochmals weiterer Marktsegmente ermöglichen werden.

Wie hoch ist nun das wirtschaftliche Potenzial? Zur Beantwortung nehmen wir einen Erfahrungswert aus der Wärmepumpen-Statistik: der Marktanteil der Wärmepumpen in Neubauten unter 20kW Heizleistung ist im Durchschnitt vom 20% im Jahr 1992 auf 61% im Jahr 2004 gestiegen. Lokal beträgt er sogar bis 80%. Vorausgesetzt, dass die technische und wirtschaftliche Entwicklung ähnliche Wege verfolgt, dürfen wir also annehmen, dass das wirtschaftliche Potenzial 75% des technischen Potenzials oder 165PJ/a beträgt.

3.4. Erschliessbares Potenzial

Das erschliessbare Potenzial ist jener Teil des wirtschaftlichen Potenziales, das in absehbarer Zeit tatsächlich realisiert wird.

Viele Parameter und Annahmen beeinflussen die Entwicklung. Wir übernehmen die Zahlen der sogenannten „Road Maps“ der CORE aus [10].

Alles in PJ/a	2010	2025	2050 [10]	2050 Sep 05
Nutzwärme aus WP für Raumheizung	8.88	36.06	77.15	51.90
Nutzwärme aus WP für Aufbereitung von Warmwasser	5.57	9.27	12.75	10.70
Nutzwärme total	14.45	45.33	89.90	62.60

Tabelle 3: Potenzial der Nutzwärme aus Umgebungswärme gemäss CORE

Für das Jahr 2050 sind zwei Varianten aufgeführt: zuerst die Zahlen vom 2004 und dann die Zahlen vom September 2005. Im Laufe der Debatte der CORE haben sich die Zahlen markant geändert bzw. es wurden energetische Anteile anders verteilt. Die Änderung hat also nichts zu tun mit einer Reduktion des Potenzials der Wärmepumpen.

Um die vorigen Zahlen zu konkretisieren, haben wir in Beilage 10.1 die Anzahl Wärmepumpen bis 2050 extrapoliert. Das Rechnungsmodell stammt aus [2], Teil Wärmepumpen-Statistik. Die verschiedenen Annahmen sind in der Beilage erklärt. Die Entwicklung wird durch die Eingabe des jährlichen Wachstums gesteuert, wobei Erfahrungswerte der Vergangenheit nicht überschritten werden. Mit der Zeit gehen die jährlichen Zuwachsraten gegen null, was die Sättigung des Marktes entspricht. Ferner wird geachtet, dass die jährliche Anzahl von Wärmepumpen maximal 80% des gesamten jährlichen Heizungsmarktes nicht überschreitet.

Mit unseren eher konservativen Annahmen werden im 2035 rund 90 PJ Nutzwärme durch 590'000 Wärmepumpen erzeugt.

Das Potenzial für Nutzwärme aus Wärmepumpen beträgt rund 90 PJ/a. Es entspricht Grössenordnung 500'000 bis 600'000 Anlagen.

3.5. Bereitstellung des Antriebsstromes für das erschliessbare Potenzial

Um das erschliessbare Potenzial, Nutzwärme von 90PJ/a auszuschöpfen, braucht es je nach Zeithorizont bzw. mittlerer Effizienz der Wärmepumpen (JAZ) 18 bis 22PJ/a Strom. Um konservativ zu rechnen, nehmen wir nachfolgend eine mittlere JAZ von 4,0 - was 22PJ/a Antriebsstrom und 68PJ/a Umgebungswärme entspricht. Die daraus errechneten Stückzahlen sind in Beilage 10.1 ersichtlich.

Für die Bereitstellung des Antriebsstromes betrachten wir zwei extreme Varianten.

a) Ohne Bau neuer Stromerzeugungsanlagen

Strom kann durch Massnahmen zur Effizienzsteigerung im Heizungssektor freigesetzt werden, ohne neue Stromproduktionsanlagen bauen zu müssen. Diese Strategie ist in [13] in Detail beschrieben. Zwei Massnahmen stehen im Vordergrund:

- Ersatz von Elektro-Widerstandsheizungen durch Wärmepumpen (Zahlen aus [11]);
- Ersatz von Öl- und Gaskesseln durch WKK-Anlagen mit Leistungen unter je 1'000kW_{el}. (Zahlen aus [12]). Angenommen sind: elektrischer Wirkungsgrad 35%, thermischer Wirkungsgrad 50%, Leitungsverluste 2,5% und Einhaltung der strengeren LRV92 (wegen der NOx-Werte!).

Für die erste Massnahme muss das realisierbare Potenzial geschätzt werden. Technisch kann jede Elektro-Heizung durch eine Wärmepumpe ersetzt werden, wirtschaftlich aber sicher nicht: Wir nehmen also an, dass die Hälfte des Ersatz-Potenziales realisierbar ist. Dies entspricht rund dem Anteil der Speicherheizungen an den gesamten Elektroheizungen gemäss[24].

Für die WKK ist schon das erschliessbare Potenzial gemeint. Das technische Potenzial wäre knapp 3 Mal grösser. Die Frage der Integration von WKK im bestehenden Stromnetz – insbesondere bei vielen dezentralen Anlagen – wurde im Sinne der reinen Potenzialbetrachtung ausser Acht gelassen.

	2050		2010	
	Freige- setzter Strom GWh/a	Freige- setzter Strom PJ/a	Freige- setzter Strom GWh/a	Freige- setzter Strom PJ/a
Ersatz Elektro- Heizungen	1'500	5.4	500	1.8
Ersatz Kessel durch WKK	13'000	46.8	2'500	9.0
<i>TOTAL freigesetzter Strom</i>	<i>14'500</i>	<i>52.2</i>	<i>3'000</i>	<i>10.8</i>
<i>Strombedarf WP</i>	<i>6'100</i>	<i>22.0</i>	<i>1'276</i>	<i>4.6</i>
BILANZ („-„ heisst Stromüberschuss	-8'400	- 39.6	- 1724	- 6.2

Tabelle 4: frei werdender Strom für den Antrieb von WP aus Ersatz bestehender Elektro-Heizungen und aus Ersatz bestehender Kessel durch WKK, Strombedarf der WP und Bilanz. Zahlen aus [12] und [11].

Es kann also mehr als genug Strom freigestellt werden, um das unter 3.4 geschätzte Nutzwärmpotenzial mittels Wärmepumpen auszuschöpfen, ohne zusätzliche Anlagen für neue Stromproduktion bauen zu müssen.

Wir erhalten für die vorher erwähnte gewünschte Nutzwärme von 90PJ/a:

- 80'000 Wärmepumpen ersetzen 80'000 Elektro-Heizungen. Statt 5,4PJ/a Strom benötigen sie 1,4PJ/a Strom. 4,0PJ/a Strom sind frei, um weitere Wärmepumpen anzutreiben. Sie erzeugen 5PJ/a Nutzwärme (es sind eher Anlagen kleiner Leistung);
- 90'000 Wärmepumpen ersetzen Kessel, aus den 4,0PJ/a obigen freigesetztem Strom erzeugen sie 16PJ/a Nutzwärme;

Netto sind noch 90 minus 21, also 69PJ/a Nutzwärme durch Wärmepumpen und WKK zu erzeugen.

- 220'000 Wärmepumpen ersetzen Kessel und erzeugen 49PJ/a Nutzwärme und verbrauchen 12PJ/a Antriebsstrom;
- 90'000 WKK-Anlagen ersetzen Kessel und erzeugen aus 36PJ/a Brennstoff 12PJ/a Strom und 20PJ/a Nutzwärme.

Insgesamt sind also 390'000 Wärmepumpen notwendig. Die Bestandesänderung ist in der nachfolgenden Figur dargestellt.

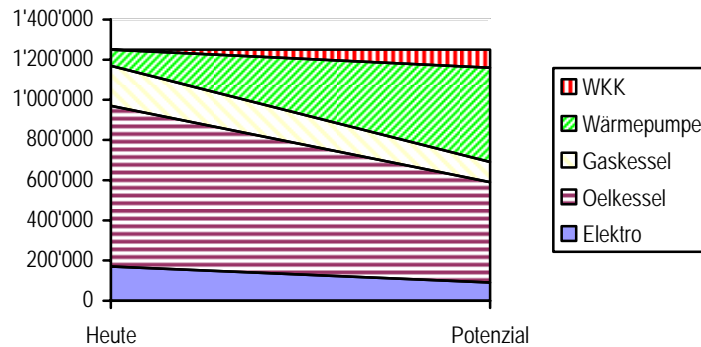


Fig. 6: Verteilung der Heizungen in der Schweiz heute (2005) und Potenzial für den Fall, dass WP und WKK Elektro-Heizungen und Kesselheizungen ersetzen.

b) Mit Bau neuer Stromerzeugungsanlagen

Für die Stromerzeugung sind Kombi-Kraftwerke (KK) gemeint. Diese sind sehr oft mit Gas betrieben. Sie kombinieren eine Gasturbine mit einem Abhitzeessel und einer Dampfturbine. Die Wärme wird gar nicht oder wenig genutzt. Von den verfügbaren Grössen her sind es eher zentralisierte grössere Anlagen mit elektrischer Leistung von 5 MW bis 400 MW. Die zwei Massnahmen sind:

- Ersatz von Elektro-Widerstandsheizungen durch Wärmepumpen (Zahlen aus [11]);
- Einbau von Kombi-Kraftwerken ohne Wärmenutzung, mit elektrischem Wirkungsgrad von 58% und Leitungsverlusten von 7.5%.

Zu berücksichtigen ist, dass aus technischen und wirtschaftlichen Gründen Kombi-Kraftwerke jährlich etwa 3 Mal länger laufen als Heizungswärmepumpen (im Schnitt 5'000 Stunden statt 1'700).

- 80'000 Wärmepumpen ersetzen 80'000 Elektro-Heizungen. Statt 5,4PJ/a Strom benötigen sie 1,4PJ/a Strom. 4,0PJ/a Strom sind frei, um weitere Wärmepumpen anzutreiben. Sie erzeugen 5PJ/a Nutzwärme (es sind eher Anlagen kleiner Leistung);
- 90'000 Wärmepumpen ersetzen Kessel, aus den 4,0PJ/a obigen freigesetztem Strom erzeugen sie 16PJ/a Nutzwärme;

Netto sind noch 90 minus 21, also 69PJ/a Nutzwärme durch Wärmepumpen und Kombi-Kraftwerke zu erzeugen.

- 310'000 Wärmepumpen ersetzen Kessel, vorwiegend Oelkessel, und erzeugen 69PJ/a Nutzwärme;
- 1 Kombi-Kraftwerke ohne Wärmenutzung von ca 300MW_{el} verbraucht 33PJ/a Brennstoff, erzeugt 18PJ/a Antriebsstrom für die Wärmepumpen.

Insgesamt sind also 480'000 Wärmepumpen notwendig. Die Bestandesänderung ist in der nachfolgenden Figur dargestellt.

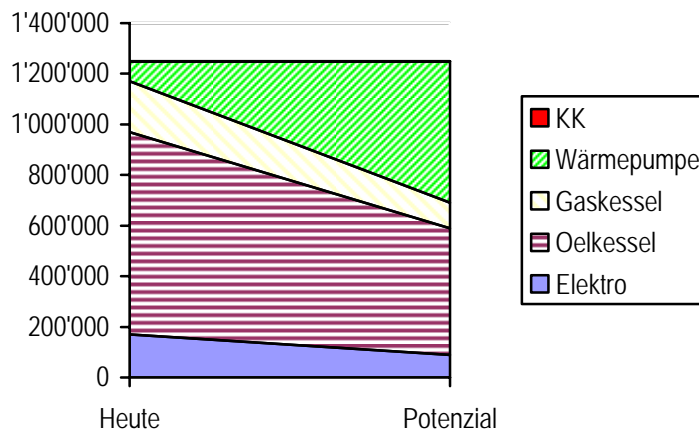


Fig. 7: Verteilung der Heizungen in der Schweiz heute (2005) und Potenzial für den Fall, dass WP mit Antriebsstrom aus Kombi-Kraftwerken (KK) Elektro-Heizungen und Kesselheizungen ersetzen.

Selbstverständlich sind Mischungen aus den Varianten a) und b) möglich.

4. Potenzial der maximalen Reduktion der CO₂-Emissionen

In der Schweiz wird Energie für Raumwärme und Warmwasser-Aufbereitung vorwiegend mit Kesseln gemacht.



Fig. 8: Energiefluss von fossil betriebenen Kessel

Diese Technologie ist ausgereift und steht an den physikalischen Grenzen. Als Systemgrenze gilt die Energieerzeugungsanlage inklusiv alle Hilfsantriebe, über ein ganzes Betriebsjahr betrachtet. Der CO₂-Ausstoss kann nicht noch um weitere 10% gesenkt werden.

Die Kombination von Wärmepumpen (WP) mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) oder Kombi-Kraftwerken (KK zum Beispiel mit Gas- und Dampfturbine (GuD) ohne Wärmenutzung) nutzt den Brennstoff deutlich besser.

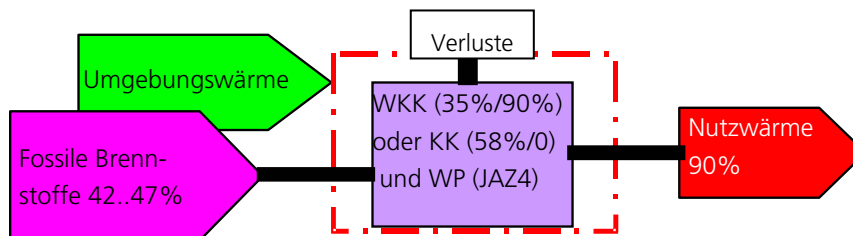


Fig. 9: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(en): der ganze Strom treibt Wärmepumpen an.

Der Einsatz fossiler Brennstoffe und die entsprechenden Emissionen werden mehr als halbiert: sie werden um Faktor 2,1 bis 2,4 reduziert.

Am besten schneidet die Kombination mit Kombi-Kraftwerk ab. Grund ist die höhere elektrische Effizienz. Ferner verursacht diese Lösung bedeutend tiefere NO_x-Emissionen als die dezentrale Wärme-Kraft-Kopplung, welche vorwiegend auf Motoren basiert.

Wir die Werte aus Studie [9], welche Lebenszyklus-Analysen, basierend auf Daten von Ecoinvent 2000, ausführt. Somit sind auch alle grauen Energien berücksichtigt, insbesondere das CO₂-Äquivalent aus Kältemittel-Verlusten durch Wärmepumpen.

Wir setzen folgenden Stand der Technik voraus: Wärmepumpen laufen im Schnitt mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0, die WKK-Anlagen erreichen im Schnitt Wirkungsgrade von 35%_{el} und von 55%_{th}. Moderne Kessel erzeugen zwischen 260 g(CO₂-äquiv.)/kWh (Gas, kondensierend) und 350 g(CO₂-äquiv.)/kWh (Oel) ([9], Seite 10). Der Kesselpark bestand 2000 aus 814'827 Oelkesseln, 200'187 Gaskesseln (aus [8]). Deren Mittelwert der Emissionen beträgt 330 g(CO₂-äquiv.)/kWh. Die gerechneten Zahlen werden zwecks Leserfreundlichkeit gerundet. Bei der WKK-Lösung wird vorausgesetzt, dass die WKK-Anlagen die strengeren Vorschriften der LRV92 und nicht die lockeren LRV98 für NO_x-Emissionen einhalten. Details der Berechnungen in der Beilage 10.4.

Für die Bereitstellung des Antriebsstromes für Wärmepumpen gilt im BFE die Strategie gemäss [13]. Drei Szenarien kommen in Frage.

- Der Antriebsstrom wird durch Ersatz von Elektro-Widerstandsheizungen durch Wärmepumpen und durch Ersatz bestehender Kessel durch WKK freigestellt. Im Falle des Ersatzes von Elektro-Widerstandsheizungen durch Wärmepumpen produziert der freigestellte Strom kein zusätzliches CO₂. Unabhängig davon, wie dieser Strom erzeugt wird, wird dank der Wärmepumpe für jede ersetzte Elektrowiderstandsheizung Strom für 3 weitere Wärmepumpen frei gesetzt. Um die spezifische Reduktion zu bestimmen, sollen die Emissionen der ersetzten Kessel auf die gesamte Nutzwärme (Kessel+Elektroheizung) verteilt werden. Wir erhalten also eine Reduktion der spezifischen Emissionen von $(JAZ - 1) / JAZ$ also 0.75. Die CO₂-Reduktion beträgt 240 g(CO₂-äquiv.)/kWh.
- Mit Strom aus effizienten BHKW bei voller Wärmenutzung entstehen rund 150g(CO₂-äquiv.)/kWh ([9], Seite 11). Die CO₂-Reduktion beträgt dann 170 g(CO₂-äquiv.)/kWh.
- Der Antriebsstrom wird durch neue moderne Kombi-Kraftwerke (KK) erzeugt. Gas-und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD) werden eine wichtige Rolle spielen. Die Reduktion des CO₂ ergibt sich also aus der Differenz zwischen: den CO₂-Emissionen, wenn die Nutzwärme durch Heizkessel mit fossilen Brennstoffen statt Wärmepumpen produziert wären, und den CO₂-Emissionen durch die fossile Stromerzeugung - unter Annahme, dass die im Kraftwerk anfallende Wärme gar nicht genutzt werden kann. Mit Strom aus Kombi-Kraftwerk (KK) werden Wärmepumpen rund 125 g(CO₂-äquiv.)/kWh ausstossen ([9], Seite 11). Die CO₂-Reduktion beträgt also 195 g(CO₂-äquiv.)/kWh.

Je nach Zusammensetzung des Antriebsstromes der Wärmepumpen beträgt die CO₂-Reduktion 170 bis 240 g(CO₂-äquiv.)/kWh. Um eine Grössenordnung zu berechnen, nehmen wir einen Durchschnitt von 200 g(CO₂-äquiv.)/kWh.

Bezogen auf das erschliessbare Potenzial von 90PJ/a erhalten wir:

Potenziale	Energie aus Umwelt	Nutzwärme	CO ₂ -Reduktion in t bzw. in % der Emissionen durch Brennstoffe
2010	2'724 GWh/a	4'000 GWh/a	800'000 t bzw. 3%
2050	68PJ/a oder 19'000 GWh/a	90PJ/a oder 25'000 GWh/a	5'000'000 t bzw. 21%

Tabelle 5: erschliessbare Potenziale für Reduktion der CO₂-Emissionen aus Brennstoffen mit Wärmepumpen und Antriebsstrom aus einer Mischung von Ersatz Elektro-Heizungen, WKK und Kombi-Kraftwerken (KK). Total der Emissionen beträgt 40,8 Mio t, davon 24,3 Mio t aus Brennstoffen, gemäss CO₂-Inventar des BUWAL [1].

Das Potenzial der Reduktionen der CO₂ –Emissionen beträgt 5 Million Tonnen oder 21% des Ausstosses aus Kesseln.

5. Potenziale der fossilen Stromerzeugung mit 0% bis 10% Reduktion von CO₂

Eine Halbierung der CO₂ –Emissionen ist gemäss 4 möglich. Eine Betrachtungsweise besteht darin, dass ein Teil oder alle eliminierten CO₂ –Emissionen aus Heizkesseln für die fossile Stromproduktion verwendet – gar „geopfert“ - wird. Dieser Ansatz wurde in [17] schon formuliert. Nachfolgend sind zwei Beispiele analysiert:

- 10% CO₂ –Reduktion erlaubt die Erzeugung von 21 bis 26PJ/a fossilem Strom;
- Keine CO₂ –Reduktion erlaubt die Erzeugung von 25 bis 31 PJ/a fossilem Strom.

Um diesen Ansatz konkret darzustellen, setzen wir die Potenzial-Zahlen von Kapitel 3.4 ein: Ziel ist, 90PJ/a Nutzwärme zu erzeugen mit maximum 72 PJ/a aus der Umgebungswärme.

Wir setzen folgenden Stand der Technik voraus: Wärmepumpen laufen im Schnitt mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0, die WKK-Anlagen erreichen durchschnittlich Wirkungsgrade von 35%el und von 55%th, Gas-Kombi-Kraftwerke einen elektrischen Wirkungsgrad von 58%; die Leitungsverluste betragen 2.5% (WKK) und 7.5% (KK).

Die gerechneten Zahlen werden zwecks Leserfreundlichkeit wiederum gerundet. Bei der WKK-Lösung ist erneut vorausgesetzt, dass die WKK-Anlagen die strengeren Vorschriften der LRV92 und nicht der lockeren LRV98 für NO_x-Emissionen einhalten. Details der Berechnungen in der Beilage 10.4.

5.1. Potenzial der fossilen Stromerzeugung mit 10% Reduktion der CO₂-Emissionen

Die Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen erlaubt die Erzeugung von fossilem Strom unter gleichzeitiger Senkung der CO₂-Emissionen. Mit 10% weniger Brenn- und Schadstoffen können 21 bis 26% Strom erzeugt werden.

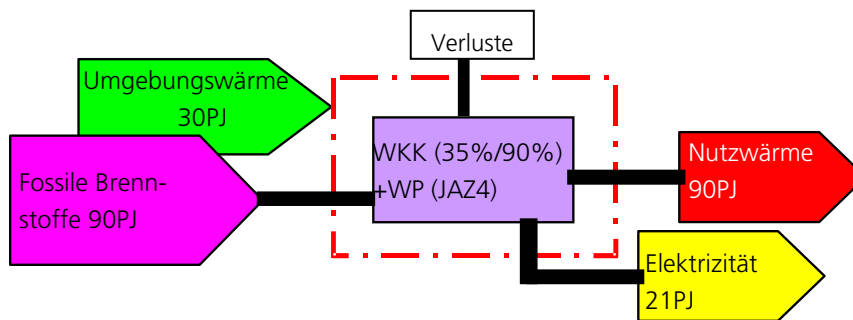


Fig. 10: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen: 33% des Stromes treibt Wärmepumpen an.

Wegen der Wärmeerzeugung durch WKK reduzieren sich die mit WP zu erzeugende Wärmemenge und damit die Nutzung der Umgebungswärme.

Beim Einsatz von Kombi-Kraftwerken (KK) wird auch ohne deren Wärmenutzung leicht mehr Strom erzeugt. Die Schadstoffe (insbesondere NO_x) sind auch tiefer.

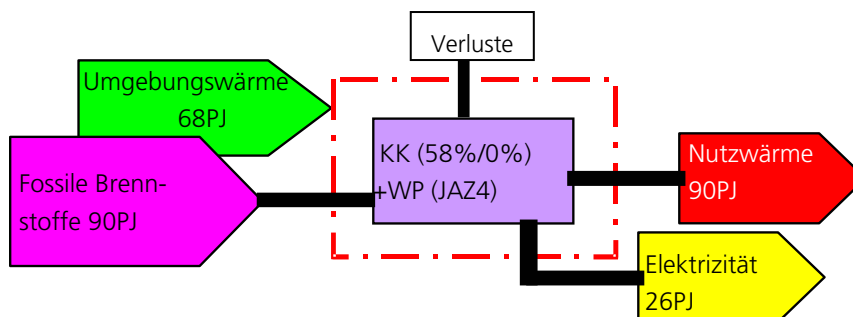


Fig. 11: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(en): 47% des Stromes treibt Wärmepumpen an.

Mit 10% weniger fossilen Brennstoffen als heute können 21 bis 26 PJ/a oder 5,8 bis 7,2 TWh/a Strom erzeugt werden. Dies entspricht 10 bis 13% des Stromverbrauches des Landes im Jahr 2004.

5.2. Potenzial der fossilen Stromerzeugung mit Stagnation der CO₂-Emissionen

Die Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen erlaubt die Erzeugung vom fossilen Strom mit Stagnation der CO₂-Emissionen. Mit gleich viel Brennstoffen und gleich viel Nutzwärme wie mit Kesseln können 25% bis 31% fossiler Strom ohne CO₂-Emissionen produziert werden.

Um diese Prozenz konkret darzustellen, setzen wir die Potenzial-Zahlen vom Kapitel 3.4 ein: Ziel ist auch hier, mit 100PJ/a Brennstoff 90PJ/a Nutzwärme mit maximal 72 PJ/a aus der Umgebungswärme zu erzeugen. Dabei wird die Stromerzeugung maximiert. Details der Berechnungen in der Beilage 10.4.

Wir setzen voraus folgenden Stand der Technik: Wärmepumpen laufen im Schnitt mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0, die WKK-Anlagen erreichen im Schnitt Wirkungsgrade von 35%el und von 55%th, Gas-Kombi-Kraftwerk einen elektrischen Wirkungsgrad von 58%; die Leitungsverluste betragen 2.5% (WKK) und 7.5% (KK). Die gerechneten Zahlen werden wieder zwecks Leserfreundlichkeit gerundet. Bei der WKK-Lösung ist vorausgesetzt, dass die WKK-Anlagen die strengere Vorschriften der LRV92 und nicht der lockeren LRV98 für NO_x-Emissionen einhalten.

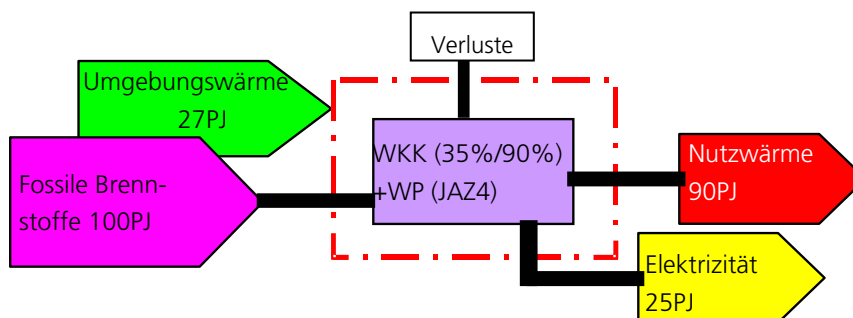


Fig. 12: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen: 33% des Stromes treibt Wärmepumpen an.

Wegen der Wärmeerzeugung durch WKK reduzieren sich die durch WP erforderliche Wärmeerzeugung und die Nutzung von Umgebungswärme.

Beim Einsatz von Kombi-Kraftwerken ohne Wärmenutzung (KK) wird leicht mehr Strom erzeugt:

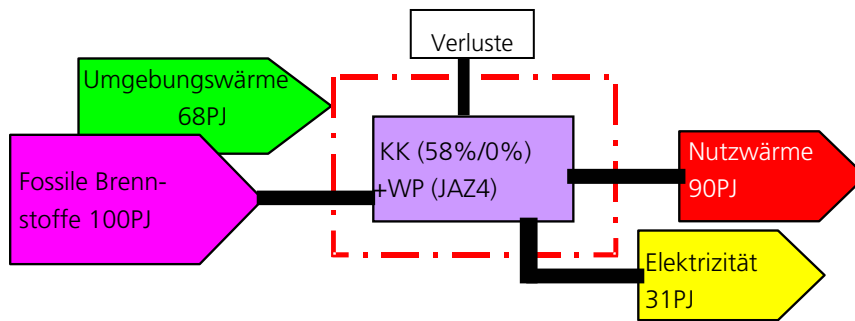


Fig. 13: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(en): 42% des Stromes treibt Wärmepumpen an.

Mit gleich viel fossilem Brennstoff wie heute können 25 bis 31 PJ/a oder 6,9 bis 8,6 TWh/a Strom erzeugt werden. Dies entspricht 12 bis 15% des Stromverbrauches des Landes im Jahr 2004.

6. Kommentare/Erläuterungen zu den Annahmen

- Lebensdauer von Wärmepumpen

Die angenommene Lebensdauer gemäss Statistik beträgt 15 Jahre. Sie entspricht der Lebensdauer gemäss SIA, welche auch die Bank für die Amortisations-Berechnung bzw. Hypothek annimmt. Tatsächlich zeigen Erfahrungen der Branche und etwa die Feldanalyse von WP-Anlagen des BFE, dass die reale Lebensdauer von neuen Anlagen heute eher um 20 Jahre liegt. Bestehende Anlagen aus der Vergangenheit mögen im Schnitt die 15 Jahre sicher erreichen. Mit der Zeit wird dieser Wert zunehmen, so dass um 2020 mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren über alle Anlagen gerechnet werden kann.

- Laufzeit

Die mittlere Laufzeit beträgt Ende 2003 genau 1'682h/Jahr. Berechnung: produzierte Wärme dividiert durch Heizleistung. Es sind also jährliche Voll-Last-Stunden. In Zukunft werden zwei Tendenzen auf diese Zahl wirken. Einerseits wird die Heizsaison durch die bessere Wärmedämmung der Gebäude immer kürzer. Andererseits werden die Anlagen länger laufen, weil die WP-Anlagen zunehmend auch die Aufbereitung des Brauchwarmwassers übernehmen. Das zweite gilt umso mehr, als das grösste Marktpotenzial für WP in Zukunft bei den Sanierungen bestehender Heizungen liegt, insbesondere von Ölheizungen. Beide Tendenzen dürften sich mehr oder weniger aufheben, so dass die mittlere Anzahl Voll-Last-Stunden sich gegen 1'700h stabilisieren sollte.

- Mittlere/durchschnittliche Leistungen

Die mittlere Heizleistung aller Wärmepumpen beträgt Ende 2003 rund 16kW_{th} . Mengenmässig dominieren die Anlagen unter 20kW Heizleistung, wobei wenige sehr grosse Anlagen dies sehr rasch kompensieren: eine 500kW -Anlage ist arithmetisch gleich bedeutend wie 100 Klein-WP in Minergie-Gebäuden! Im Jahr 1990 betrug die durchschnittliche Heizleistung aller Wärmepumpen 24kW_{th} . Die Aufteilung des Absatzes des Jahres 1980 nach Leistungen, verglichen mit 2003 zeigt, dass es ganz anders war als heute:

Absatzdaten	< 20kW	20-50kW	50-100kW	>100kW
1980	2531	398	128	183
2003	8130	416	90	41

Tabelle 6: Absatzdaten der Jahre 1980 und 2003, nach Leistungsklassen.

Damals wurden vorwiegend mittlere und grössere Anlagen installiert, was in Zukunft also auch wieder der Fall sein dürfte.

In Zukunft liegen die grössten Absatzpotenziale in zwei Marktsegmenten: Heizungssanierungen (tendenziell höhere Heizleistungen als Neubauten gleicher Gebäudekategorie) und grössere Anlagen. Entgegen wirkt die bessere Wärmedämmung der Gebäude, welche die mittlere Heizleistung nach unten zieht. Eine Zahl anzunehmen ist daher schwierig.

Aus den Verbrauchswerten in [8] haben wir in Beilage 8 eine durchschnittliche Leistung der bestehenden Kessel-Heizungen von rund $35 \text{ kW}_{\text{th}}$ hochgerechnet (es ist die durchschnittliche Heizleistung und nicht die durchschnittliche Leistung der Kessel). In der Beilage 8 setzen wir also für unsere Extrapolation einen Durchschnitt für WP ab 2030 von $25 \text{ kW}_{\text{th}}$.

- Kosten

Das BFE-Projekt 'Technologie-Monitoring' [16] hat zuverlässige Daten geliefert. Im Jahr 2003 kostete eine Wärmepumpe etwa CHF 1'600.- / kW_{th} (Luft/Wasser-Wärmepumpe, nur Wärmeerzeugung, keine Wärmeverteilung). Die Kosten sind innerhalb 10 Jahren fast halbiert worden. Eine weitere Halbierung kann durch Skaleneffekte erreicht werden.

Grund: Wärmepumpen-Hersteller sind Komponentenkäufer und –Einbauer. Die Komponenten werden von weltweit tätigen Firmen gebaut (Copeland, Danfos,...). Diese stellen nur Komponenten für Wärmepumpen her, wenn der WP-Markt genug gross ist. Diese Tatsache hat der bekannte Hersteller von Kompressoren Copeland im Jahr 2004 mit der Einführung einer neuen Reihe von Kompressoren für WP-Anwendungen auf dem Markt illustriert. Wenn dies geschieht, dann sinken die Komponenten-Preise drastisch. Die Eintrittsgrösse steht aber hoch: für solche Firmen sind 10'000 Stück eine Vorserie... und ein Marktsegment beginnt ab 50'000 Stück im Jahr. Wenn der WP-Markt europaweit gross genug wird, dann werden die angepassten Komponenten ganz billig angeboten. Nachher könne die WP-Bauer mehr maschinell fertigen. Eine solche Investition lohnt sich ab 30'000 bis 50'000 Stücke im Jahr (siehe dazu Schlussbericht zum BFE-Projekt 'Swiss Retrofit Heat Pump SRHP').

- Marktanteile, Marktverhältnisse

Das Potenzial für die Anzahl Wärmepumpen ist plausibel: der Bestand der Heizungen wird sich von Kesseln in Richtung Wärmepumpen verschieben.

Im Jahr 2003 wurden 42'939 Heizungen installiert, davon 32'460 mit Kesseln und 8'732 mit Wärmepumpen. Den Heizungsmarkt nehmen wir also konstant auf jährlich 50'000 Heizungen an.

- Jahresarbeitszahl (JAZ)

Heute beträgt der durchschnittliche JAZ des Anlageparks Schweiz knapp 3,0. Dieser Wert wurde ermittelt im [5]. Für die heute neu installierten Anlagen beträgt die durchschnittliche JAZ im Neubau eher 3,5. Im Konzept 2004-2007 des Bereiches Umgebungswärme für die CORE wurde folgende JAZ durch die CORE verabschiedet (Auszug):

	Hauptsystem	Komponenten	Umsetzungen	Infrastruktur	Rahmenbedingungen
2004-07	JAZ im Feld : L/W=3.0 (Sanierung: 2.7) S/W=4.0 (Sanierung: 3.0) W/W=4.5 (Sanierung: 3.3) Kombinierte Kälte-/Wärmeerzeugung)	Umweltfreundliche Arbeitsmittel (NH ₃ , CO ₂) bei gleicher JAZ Erdwärmesonden mit CO ₂ (Direktverdampfung)	<50 kW: Fokus auf Sanierung, insb. bestehender Elektro-Widerstandsheizungen >50 kW: kombinierte Wärme-/Kältenutzung mit insges. 25% höherem Gesamtwirkungsgrad Optimierung von Gewerbe-Kälteanlagen	Stärkerer Einsatz von WP in Hausrenovierungen	El. Markt Liberalisierung (+) Preis (-) mit höherem Öl-/Gaspreis wäre Akzeptanz noch besser (vergleiche Schweden)
2008-19	Exergieoptimierung -> Gütegrad 80 % -> maximale JAZ erreicht bis 2015 im Feld d.h. L/W= 5 S/W= 6 W/W= 8	Neue Kompressoren Kombination WP / Winterwärme	Optimale bauliche Integration der WP Abluftnutzung als Wärmequelle 20% Marktanteil für Heizungsrenovierungen inkl. Ersatz der ersten WP	Effiziente WKK erzeugen Elektrizität für dezentrale WP d.h ca 20 GuD ca 5'000 SwissMotor und ca 10'000 kleine Brennstoffzellen Hersteller-Konzentration weltweit, nur noch 2 in CH	CO ₂ -Abgabe Öl- und Gasheizungen sind verpönt
2020-29	WW-Leistung / Heizungsleistung 1:1	Saisonale Speichersysteme / WP /Solathermie	F&E-Programm massgeblich durch Industrie finanziert Altbau-Abreiss-Welle	Biofuels in WKK	Erdölpreis > 50\$ pro Barrel (+)
Nach 2030	Wandintegrierte Mikro WP mit Direktverdampfung und DirektKondensation	ölfreie Kompressoren, umweltfreundliche Kältemittel NH ₃ und CO ₂	F&E nur durch Industrie finanziert Nur noch NH ₃ und CO ₂ zugelassen	Elektrizität aus Wasserkraft und WKK	Öl wird nicht mehr zum Heizen verwendet, WP ist normalfall

**Tabelle 7: Bisher Erreichtes und angestrebte Ziele, Auszug aus dem Konzept 2004-2007 des Bereiches Umgebungswärme, WKK, Kälte, durch die CORE am 10.9.2004 verabschiedet (Tabelle neu formatiert, aber Inhalt unverändert).
Abkürzungen: L: Luft, S: Sole, W: Wasser**

Im Sinne einer Potenzialbetrachtung darf also im Schnitt über alle Anlagen und Zeithorizont 2020 eine JAZ von 4,0 angenommen werden. Neuere, effizientere Anlagen ziehen den Durchschnitt nach oben, aber die Anzahl neu installierter ist immer kleiner als die Anzahl bestehender Anlagen. Daher die scheinbare langsame Verbesserung des Schnittes über alle installierte Anlagen. Langfristig (Zeithorizont 2050) dürfte sicher 5,0 angenommen werden.

- Grössenordnungen für den Stromverbrauch

Am meisten werden elektrisch angetriebene Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Auch die jüngsten Entwicklungen gehen in diese Richtung, zum Beispiel Wärmepumpen mit dem magneto-kalorischen Effekt. Aus [2], [12], [14] und [18] möchten wir einige Grössenordnungen für Stromverbräuche in Erinnerung rufen:

	TWh/a	In % des Verbrauches 2003 der CH
Verbrauch aller WP 2000	0.61	1.1
Verbrauch aller WP 2003	0.69	1.2
Verbrauch aller WP 2004	0.70	1.2
Potenzial des Verbrauchs aller WP 2010	1.22	2.2
Potenzial des Verbrauchs aller WP 2050	5.0	10.0
Verbrauch Elektro-Heizungen	3.0	5.5
Verbrauch Oel- und Gasbrenner	0.6	1.1
Verbrauch von Kälteanlagen (Klima, Kühlung...)	5.5	9.1
Verbrauch von Haushaltgeräten	7.1	12.9
Kühl- und Gefriergeräte	2.5	4.5
Geschirrspüler	0.4	0.7
Waschmaschinen	0.6	1.1
Wäschetröckner	0.4	0.7
Kaffeemaschinen	0.4	0.7
Verbrauch für Beleuchtung	5.8	10.5
Verbrauch für Büro, Kommunikation	1.5	2.7
Verbrauch Unterhaltungselektronik	1.2	2.2

Tabelle 8: Stromverbrauch ausgewählter Verbraucher, gemäss [2] und [18].

Die Wärmepumpen benötigen relativ wenig Strom: Ende 2003 verbrauchten sie etwa gleich viel Strom wie Waschmaschinen. Ende 2050 werden WP bei voller Ausschöpfung der Potenziale rund 2/3 des Verbrauches aller Haushaltgeräte brauchen. Die Zunahme für neue Wärmepumpen kann weitgehend durch Ersatz von Elektro-Heizungen gedeckt werden. Bei Haushaltgeräten und Kältemaschinen ist langfristig im Schnitt eine Verbesserung der Effizienz um 25% möglich.

7. Referenzen

- [1] Programmziele EnergieSchweiz, Sektorziele und Zielbeiträge 2001 und 2002, BFE, Bern, Februar 2004
Daten von EnergieSchweiz gemäss [1], 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
Ziel EnergieSchweiz für Brennstoffe, gesamt: 50'503 TJ
Ziel EnergieSchweiz für Brennstoffe, notwendiger Zielbeitrag der erneuerbaren Energien: 10'800 TJ
- [2] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2002, BFE, Bern, August 2003, BBL 805.006.02
- [3] Steps toward a sustainable development, A white book for R&D of energy-efficient technologies, Novatlantis, E. Jochem (Editor), CEPE ETH, Zürich, März 2004
- [4] Konzept Umgebungswärme, WKK, Kälte 2004-2007, verabschiedet durch die CORE am 10.9.2004
- [5] M. Ehrbar, M. Erb, P. Hubacher, Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003, Schlussbericht, April 2004, ENET 240016
- [6] Das Potenzial von Wärmepumpen-Heizungen im Falle eines Erdoel-Lieferstoppes, BFE, Bern, Juli 1983 (internes Arbeitspapier, nur noch 1 Exemplar im Archiv).
- [7] 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.
- [8] Bundesamt für Statistik, Volkszählung 2000, Kennzahlen von Gebäuden und Wohnungen, aus www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/bau-_und_wohnungswesen. Siehe Beilage 10.3.
- [9] Projekt GaBE: Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen, Perspektiven der zukünftigen Strom- & Wärmeversorgung für die Schweiz, PSI, Villigen, August 2001.
- [10] Road Map für die erneuerbaren Energien in der Schweiz bis 2050, SATW, Bern, November 2004
- [11] R. Rigassi, HP. Eicher, Zukünftige Marktbedeutung von WKK-Anlagen ($1-1'000\text{kW}_{el}$), BFE, Bern, 2003
- [12] Ueberprüfung der Erhebung der Widerstandsheizungen, BFE, Sektion Statistik, Notiz vom 8.9.2003

- [13] Die Wärme-Kraft-Kopplung im Programm EnergieSchweiz, BFE, August 2003 (Dok.-ID 003692950)
- [14] J. Nipkow, Stand-by-Verbrauch von Haushaltgeräten, BFE, Bern, Juni 2003
- [15] Erneuerbare Energien in der Region Hegau/Bodensee, Solarcomplex, Hilzingen (D), Januar 2002,
- [16] HP. Eicher, W. Ott, R. Rigassi, Technologie-Monitoring, Schlussbericht, BFE, Oktober 2003
- [17] Martin Zogg, Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, BFE, Mai 2002
- [18] P. Hofer et al., Die Entwicklung des Elektrizitätsverbrauches serienmässig hergestellter Elektrogeräte in der Schweiz, Prognos AG, BFE, Bern, Dezember 2002.
- [19] Energieperspektiven 2053/2050, Der Energieverbrauch der privaten Haushalte, P. Hofer, Prognos AG, BFE, April 2005
- [20] Energieperspektiven 2053/2050, Energieverbrauch der Dienstleistung und der Landwirtschaft, CEPE, BFE, April 2005
- [21] Das Potenzial von Wärmepumpen-Heizungen im Fall eines Erdöl-Lieferstoppes, BFE, Bern Juli 1983
- [22] IEA PVPS, Task 7 Potenzial of building integrated PV Systems, IEA, 2002
- [23] D. Favrat, G. Sarlos et al., Projet PACLAC, Valorisation de l'énergie thermique des lacs pour le chauffage urbain, Rapport final, NEFF, mars 1995
- [24] M. Strebel, W. Seidinger, Heizkörperwärmepumpe, Zusammenfassung bisher erarbeiteter Informationen und Grundlagen zur Förderstrategie, BFE, Bern, August 1997

8. Verzeichnis der Abkürzungen

a, /a	Jahr, pro Jahr
äquiv.	Äquivalent
BWW	Brauchwarmwasser (gleich wie WW)
CH	Schweiz
CORE	Eidgenössische Energieforschungskommission
el	Elektrisch
g	Gramm
GuD	Gas- und Dampfturbine
GWh	Giga-Watt-Stunden
h	Stunden
JAZ	Jahresarbeitszahl
KK	Kombi-Kraftwerk (Kombination von Gas- und Dampfturbine in einem Kraftwerk)
kW	Kilo-Watt
L/W	Luft/Wasser
PJ	Petajoule
S/W	Sole/Wasser
T	Tonnen
th	Thermisch
TWh	Tera-Watt-Stunden
W/W	Wasser/Wasser
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser (gleich wie BWW)

9. Verzeichnis der Figuren und Tabellen

Fig. 1: Energiefluss von fossil betriebenen Kessel	4
Fig. 2: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	4
Fig. 3: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(e), der ganze Strom treibt Wärmepumpen an.	5
Fig. 4: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(e), 42% des Stromes treibt Wärmepumpen an.	5
Fig. 5: Energiefluss von fossil betriebenen Kessel	7
Fig. 6: Verteilung der Heizungen in der Schweiz heute (2005) und Potenzial für den Fall WP und WKK ersetzen Elektro-Heizungen und Kesselheizungen.	13
Fig. 7: Verteilung der Heizungen in der Schweiz heute (2005) und Potenzial für den Fall WP ersetzen Elektro-Heizungen und Kesselheizungen mit Antriebsstrom aus Kombi-Kraftwerk (KK).	14
Fig. 8: Energiefluss von fossil betriebenen Kessel	15
Fig. 9: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(e), der ganze Strom treibt Wärmepumpen an.	15
Fig. 10: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, 33% des Stromes treibt Wärmepumpen an.	18
Fig. 11: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(e), 47% des Stromes treibt Wärmepumpen an.	18
Fig. 12: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, 33% des Stromes treibt Wärmepumpen an.	19
Fig. 13: Energiefluss der Kombination von Wärmepumpen mit Kombi-Kraftwerk(e), 47% des Stromes treibt Wärmepumpen an.	20
Tabelle 1: Potenziale der Umgebungswärme und der daraus erzeugbare Nutzwärme mittels Wärmepumpen. Bei der CO ₂ -Reduktion ist die Aufbereitung vom Antriebsstrom berücksichtigt.	6
Tabelle 2: Potenziale der Umgebungswärme und der daraus erzeugbare Nutzwärme mittels Wärmepumpen, umgerechnet in Stückzahlen. Bei der CO ₂ -Reduktion ist die Aufbereitung vom Antriebsstrom berücksichtigt.	6
Tabelle 3: Potenzial der Nutzwärme aus Umgebungswärme gemäss CORE.	10
Tabelle 4: Potenzial an Strom für Antrieb von WP aus Ersatz bestehender Elektro-Heizungen durch WP und bestehender Kessel durch WKK sowie entsprechende Nutzwärme und Anteil erneuerbarer Energie. Zahlen aus [12] und [11].	12
Tabelle 5: erschliessbares Potenziale für Reduktion der CO ₂ -Emissionen durch Brennstoffen durch Wärmepumpen mit Strom aus einer Mischung von Ersatz Elektro-Heizungen, WKK und Kombi-Kraftwerk (KK). Total der Emissionen beträgt 40,8 Mio t davon 24,3 Mio t aus Brennstoffen, gemäss CO ₂ -Inventar des BUWALS. [1].	17
Tabelle 6: Absatzdaten der Jahre 1980 und 2003, nach Leistungsklassen.	21

Tabelle 7: Bisher Erreichtes und angestrebte Ziele, Auszug aus dem Konzept 2004-2007 des Bereiches Umgebungswärme, WKK, Kälte, durch die CORE am 10.9.2004 verabschiedet. Abkürzungen: L: Luft, S: Sole, W: Wasser	23
Tabelle 8: Stromverbrauch ausgewählter Verbraucher, gemäss [2] und [18].....	24

10. Beilagen

10.1. Berechnung der Anzahl Anlagen bis 2050.

Eingabedaten sind eingerahmt			12.09.2005
Gerechnete Felder sind grau hinterlegt			BFE/EE/F. Rognon
Vergleichszahlen aus Kesselstatistik vom 2000:			
Oelkessel	Absatz/a	Absatz Sanierungen	Ersatzrate auf kumuliert
814'827	21'200	18'020	2.2%
			Ersatzrate auf Absatz/a
			85.0%

Annahmen für die Eingaben:

Zuwachs im % vom Vorjahr 10% während EnergieSchweiz dann abnehmend
 WP-Absatz jährlich beträgt maximal 80% des jährlichen Heizungsmarktes also 40'000 Stk/a
 Anzahl Anlagen kumuliert darf maximal 80% aller heutigen Kesselanlagen erreichen also 812'011
 Anzahl nicht kumulierte WP in % aller WP nimmt zu auf 5% (=Lebensdauer von 20)
 Ersatzrate von WP durch WP wächst stetig zu bis auf 100% (Sättigung des Marktes)
 Durchschnittliche Heizleistung pro Anlage geht auf 25kW ab 2030

		PJ	TJ
Wärme aus			
Kessel	(Oel+Gas)	222	222'000
Laufzeit	Std	1'700	
Leistung	GW	36	
Leistung	MW	36'275	
Anzahl	Oel, Gas,		
Kessel	Kohle, Elektro	1'015'014	
Durschn.			
Leistung	kW	35.7	

Referenzen:

Steps toward a sustainable development, Novatantis, CEPE ETH, Zürich, März 2004

Gemäss Volkszählung 2000, siehe www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/bau-_und_wohnungswesen/.....

Berechnung der Mengen aus den Zuwachsraten

Jahr	Anzahl Anlagen kumuliert	Zuwachs im % vom Vorjahr	Zuwachs Anzahl kumulierte WP	WP-Absatz jährlich (durch WP oder total andere ersetzt)	Anzahl nicht kumulierte WP	Anzahl nicht kumulierte WP in % des jährlichen Absatzes	Anzahl nicht kumulierte WP in % aller WP
1990	34824						
1991	0						
1992	38268						
1993	39750	3.9					
1994	42446	6.8					
1995	45064	6.2		3309			
1996	47864	6.2	2'800	4160	691	16.6%	1.5%
1997	50988	6.5	3'124	4207	1360	32.3%	2.8%
1998	55209	8.3	4'221	5225	1083	20.7%	2.1%
1999	59288	7.4	4'079	6155	1004	16.3%	1.8%
2000	64050	8.0	4'762	6160	2076	33.7%	3.5%
2001	68996	7.7	4'946	6943	1398	20.1%	2.2%
2002	74005	7.3	5'009	7554	1997	26.4%	2.9%
2003	80011	8.1	6'006	8677	2545	29.3%	3.4%
2004	86'950	10.0	6'939	9796	2671	27.3%	3.3%
2005	95'645	10.0	8'695	11'598	2903	25.0%	3.3%
2006	105'210	10.0	9'565	12'757	3193	25.0%	3.3%
2007	115'730	10.0	10'521	14'033	3512	25.0%	3.3%
2008	127'303	10.0	11'573	15'436	3863	25.0%	3.3%
2009	140'034	10.0	12'730	16'980	4250	25.0%	3.3%
2010	154'037	10.0	14'003	18'678	4675	25.0%	3.3%
2011	169'441	10.0	15'404	21'565	6161	28.6%	4.0%
2012	186'385	9.6	16'944	23'722	6778	28.6%	4.0%
2013	204'278	9.2	17'893	25'348	7455	29.4%	4.0%
2014	223'072	8.8	18'794	26'965	8171	30.3%	4.0%
2015	242'702	8.4	19'630	28'553	8923	31.3%	4.0%
2016	263'089	8.0	20'387	30'095	9708	32.3%	4.0%
2017	284'136	7.6	21'047	31'571	10524	33.3%	4.0%
2018	305'730	7.2	21'594	32'960	11365	34.5%	4.0%
2019	327'743	6.8	22'013	34'242	12229	35.7%	4.0%
2020	350'029	6.4	22'287	35'396	13110	37.0%	4.0%

Jahr	Anzahl Anlagen kumuliert	Zuwachs im % vom Vorjahr	Zuwachs Anzahl kumulierte WP	WP-Absatz jährlich (total)	Anzahl nicht kumulierte WP (durch WP oder andere ersetzt)	Anzahl nicht kumulierte WP in % des jährlichen Absatzes	Anzahl nicht kumulierte WP in % aller WP
2021	372'431	6.0	22'402	36'403	14001	38.5%	4.0%
2022	394'777	5.6	22'346	37'243	14897	40.0%	4.0%
2023	416'885	5.2	22'108	37'899	15791	41.7%	4.0%
2024	438'563	4.8	21'678	38'353	16675	43.5%	4.0%
2025	459'614	4.4	21'051	38'594	17543	45.5%	4.0%
2026	479'837	4.0	20'223	38'608	18385	47.6%	4.0%
2027	499'030	3.6	19'193	38'387	19193	50.0%	4.0%
2028	516'995	3.2	17'965	37'926	19961	52.6%	4.0%
2029	533'539	2.8	16'544	37'224	20680	55.6%	4.0%
2030	548'478	2.4	14'939	36'281	21342	58.8%	4.0%
2031	561'642	2.0	13'163	35'103	21939	62.5%	4.0%
2032	572'874	1.6	11'233	33'698	22466	66.7%	4.0%
2033	582'040	1.2	9'166	32'081	22915	71.4%	4.0%
2034	589'025	0.8	6'984	30'266	23282	76.9%	4.0%
2035	593'737	0.4	4'712	28'273	23561	83.3%	4.0%
2036	596'112	0.0	2'375	26'124	23749	90.9%	4.0%
2037	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2038	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2039	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2040	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2041	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2042	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2043	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2044	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2045	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2046	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2047	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2048	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2049	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%
2050	596'112	0.0	0	23'844	23844	100.0%	4.0%

Berechnung der Energien aus den Mengen

Jahr	Installierte Heizleistung/Anzahl Anlagen (kW)	Installierte Heizleistung		Stromverbrauch (GWh)	Wärme- produktion (TJ)	Anteil erneuerbare Energie (TJ)	Wärmeprod./Anzahl Anlagen (kWh)
		(MW)	JAZ				
1990	24	850	2.6	534	4'975	3'053	39'685
1991					0	0	
1992	24	902	2.6	591	5'555	3'427	40'321
1993	23	921	2.6	605	5'731	3'553	40'050
1994	23	956	2.7	574	5'533	3'467	36'211
1995	22	979	2.7	629	6'084	3'820	37'502
1996	21	1003	2.7	688	6'653	4'176	38'609
1997	20	1030	2.8	630	6'239	3'971	33'988
1998	19	1074	2.8	662	6'631	4'248	33'364
1999	19	1103	2.8	663	6'761	4'374	31'676
2000	18	1136	2.9	638	6'620	4'324	28'712
2001	17	1175	2.9	673	7'056	4'633	28'407
2002	16	1216	3.0	665	7'106	4'712	26'674
2003	16	1268	3.0	711	7'679	5'119	26'659
2004	16	1'391	3.1	763	8'514	5'768	27'200
2005	16	1'559	3.2	841	9'541	6'512	27'710
2006	16	1'683	3.2	894	10'302	7'083	27'200
2007	17	1'967	3.3	1'029	12'041	8'336	28'900
2008	17	2'164	3.3	1'115	13'245	9'231	28'900
2009	17	2'381	3.4	1'208	14'569	10'220	28'900
2010	17	2'619	3.4	1'309	16'026	11'312	28'900
2011	18	3'050	3.5	1'503	18'666	13'255	30'600
2012	18	3'355	3.5	1'630	20'532	14'666	30'600
2013	18	3'677	3.6	1'761	22'503	16'164	30'600
2014	18	4'015	3.6	1'896	24'574	17'748	30'600
2015	19	4'611	3.7	2'148	28'221	20'489	32'300
2016	19	4'999	3.7	2'297	30'592	22'324	32'300
2017	19	5'399	3.8	2'447	33'039	24'229	32'300
2018	19	5'809	3.8	2'599	35'550	26'195	32'300
2019	20	6'555	3.9	2'894	40'116	29'696	34'000
2020	20	7'001	4.0	2'975	42'844	32'133	34'000

Jahr	Installierte	Installierte		Strom- verbrauch (GWh)	Wärme- produktion (TJ)	Anteil erneuerbare Energie (TJ)	Wärmeprod/A nzahl Anlagen (kWh)
	Heizleistung/A nzahl Anlagen (kW)	Heiz- leistung (MW)	JAZ				
2021	21	7'821	4.0	3'297	47'865	35'997	35'700
2022	21	8'290	4.1	3'466	50'737	38'260	35'700
2023	22	9'171	4.1	3'803	56'129	42'439	37'400
2024	22	9'648	4.1	3'968	59'048	44'762	37'400
2025	23	10'571	4.2	4'313	64'695	49'168	39'100
2026	23	11'036	4.2	4'467	67'542	51'460	39'100
2027	24	11'977	4.2	4'810	73'298	55'982	40'800
2028	24	12'408	4.3	4'944	75'936	58'138	40'800
2029	24	12'805	4.3	5'063	78'366	60'140	40'800
2030	25	13'712	4.3	5'380	83'917	64'550	42'500
2031	25	14'041	4.4	5'467	85'931	66'251	42'500
2032	25	14'322	4.4	5'534	87'650	67'728	42'500
2033	25	14'551	4.4	5'580	89'052	68'963	42'500
2034	25	14'726	4.5	5'605	90'121	69'942	42'500
2035	25	14'843	4.5	5'608	90'842	70'652	42'500
2036	25	14'903	4.5	5'589	91'205	71'084	42'500
2037	25	14'903	4.6	5'548	91'205	71'231	42'500
2038	25	14'903	4.6	5'508	91'205	71'375	42'500
2039	25	14'903	4.6	5'469	91'205	71'518	42'500
2040	25	14'903	4.7	5'430	91'205	71'658	42'500
2041	25	14'903	4.7	5'391	91'205	71'797	42'500
2042	25	14'903	4.7	5'353	91'205	71'933	42'500
2043	25	14'903	4.8	5'316	91'205	72'068	42'500
2044	25	14'903	4.8	5'279	91'205	72'201	42'500
2045	25	14'903	4.8	5'243	91'205	72'332	42'500
2046	25	14'903	4.9	5'207	91'205	72'461	42'500
2047	25	14'903	4.9	5'171	91'205	72'588	42'500
2048	25	14'903	4.9	5'136	91'205	72'714	42'500
2049	25	14'903	5.0	5'102	91'205	72'838	42'500
2050	25	14'903	5.0	5'068	91'205	72'960	42'500

10.2. Übersicht Heizungsmarkt 2000 und 2003

Daten aus Statistik der erneuerbaren Energien des BFE, 2003 und procal (www.procal.ch/statistik.html)

Vermerk: rund 85% der Kessel ersetzen bestehende Kessel

HEIZUNGEN		2000	2003	2003
Ölkessel	konv.	21200	17000	40%
	kondensierend	0	950	2%
Gaskessel	alle	12770	14510	34%
Feststoffkessel	alle	950	860	2%
Wärmepumpen		7164	8732	20%
Holzessel	Pellets	330	617	1%
	Automatisch<50kW	67	136	0%
	Automatisch>50kW	258	134	0%
TOTAL		42739	42939	
BOILER		2000	2003	
Gasboiler	alle	990	870	
Wassererwärmer	alle	28185	28510	
Durchlauferhitzer		2300	2000	
Wärmepumpen	alle	244	400	
TOTAL		31719	31780	
TOTAL Heizungen + Boiler		74458	74719	

10.3. Übersicht Energieträger der Heizungen in Gebäuden aus der Volkszählung 2000.

Gebäude nach Heizungsart und Energieträger der Heizung					
Daten aus: http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/bau-und_wohnungswesen/gebaeude_und_wohnungen/blank/kennzahlen0/gebaeude/heizung.html					
	Jahr	1990	1990	2000	2000
		absolut	in %	absolut	in %
Energieträger der Heizung		1990		2000	
	Heizöl	756'001	58,7	814'827	56,0
	Holz	221'910	17,2	189'571	13,0
	Wärmepumpe	24'744	1,9	60'109	4,1
	Elektrizität	155'020	12,0	166'248	11,4
	Gas	110'149	8,6	200'187	13,8
	Fernwärme	14'280	1,1	20'593	1,4
	Kohle	5'241	0,4	1'057	0,1
	Sonnenkollektor	375	0,0	944	0,1
	Andere	366	0,0	964	0,1
		1'288'086		1'454'500	
© Bundesamt für Statistik / Volkszählung 2000, Neuchâtel 2004					

10.4. Detailberechnungen für Kapitel 5. Siehe auch [17]

Berechnungen für die Varianten WP+WKK und WP+KK, in%
Kursiv: Eingaben, Brennstoff und Anteil WKK/KK-Strom für WP
Eingerahmt: gewünschte Zielwerte

WKK+WP:

Fall	<i>Brennstoff</i>	WKK Strom brutto	WKK Strom netto	WKK Wärme	Anteil WKK- Strom für WP	Strom für WP	WP Wärme	WP Umgebungswärme	Wärme total	Strom aus WKK FREI
1	47.0	16.5	16.0	25.9	1.000	16.04	64.2	48.1	90	0.0
2	36.0	12.6	12.3	19.8	1.000	12.29	49.1	36.9	69	0.0
3	90.0	31.5	30.7	49.5	0.330	10.14	40.5	30.4	90	20.6
4	100.0	35.0	34.1	55.0	0.260	8.87	35.5	26.6	90	25.3

Fall Im Text Bemerkung

- Fig. 2,9 PJ, Wärme 90PJ mit minimalem Brennstoff, ohne Strom
- Kap 3.5a PJ, WKK+WKK erzeugen 69PJ
- Fig. 10 PJ, maxi=Wärme 90PJ mit maximalem Strom, Brennstoff -10%
- Fig. 12 PJ, maxi Strom, Brennstoff wie Kessel (100PJ), maxi 72PJ aus Umwelt

WKK:	ETAel	0.35
	ETAth	0.55
Netz	Verluste	0.025
WP	JAZ	4

KK+WP:

Fall	<i>Brennstoff</i>	KK Strom brutto	KK Strom netto	KK Wärme	Anteil KK- Strom für WP	Strom für WP	WP Wärme	WP Umgebungswärme	Wärme total	Strom aus KK FREI
1	42.0	24.4	22.5	0.0	1.000	22.53	90.1	67.6	90.1	0.0
2	33.0	19.1	17.7	0.0	1.000	17.70	70.8	53.1	70.8	0.0
3	100.0	58.0	53.7	0.0	0.420	22.53	90.1	67.6	90.1	31.1
4	90.0	52.2	48.3	0.0	0.466	22.50	90.0	67.5	90.0	25.8

Fall Im Text Bemerkung

- Fig. 3,9 PJ, Wärme 90PJ mit minimalem Brennstoff, ohne Strom
- Kap 3.5b PJ, WKK+KK erzeugen 69PJ
- Fig. 4,13 PJ, Netto-Nutzwärme von 90PJ, Brennstoff wie Kessel (100PJ)
- Fig. 11 PJ, maxi=Wärme 90PJ mit maximalem Strom

KK	ETAel	0.58	Umrechnung PJ in Anzahl Anlagen:	
	ETAth	0	Anzahl	PJ PJ/Heizg
Netz	Verluste	0.075	1'015'014	222 0.000219
WP	JAZ	4	411'492	90
			315'477	69
			224'035	49
			86'871	19
			73'154	16