

Exkurs 16: Wärmepumpen und Strombedarf zur Wärmeerzeugung

Peter Hofer
Almut Kirchner
Marco Wunsch (alle Prognos AG)

Mit Beiträgen von U. Schärer, BFE

30.01.2007

Wärmepumpen als Heizungssysteme stellen in der Schweiz einen Anteil der Heizsysteme, insbesondere bei neuen Ein- und Zweifamilienhäusern sowie zunehmend bei kleineren neuen Objekten im Dienstleistungssektor.

Die Einschätzungen bezüglich der künftigen Möglichkeiten, die den Wärmepumpen in der künftigen Entwicklung des Energiesystems zugesprochen werden, sind je nach Betrachtungswinkel sehr unterschiedlich.

In diesem Exkurs werden die Technik kurz erläutert, infrastrukturelle Voraussetzungen sowie Auswirkungen des Einsatzes aufgezeigt, die bisherige Entwicklung des Wärmepumpeneinsatzes in der Schweiz referiert sowie die Annahmen für die Entwicklung in den Szenarien der Energieperspektiven erläutert.

Inhaltsverzeichnis

1. Physik und Technik der Wärmepumpe	4
1.1. Physikalische Funktionsprinzipien	4
1.1.1. Kompressionswärmepumpe	4
1.1.2. Absorptionswärmepumpe	5
1.1.3. Adsorptionswärmepumpe	6
1.2. Kenngrößen von Wärmepumpen-Prozessen	7
1.3. Wärmequellen	9
1.3.1. Aussenluft und Abluft als Wärmequelle	9
1.3.2. Oberflächennahes Erdreich	10
1.3.3. Oberflächenwasser, Grundwasser, Abwasser	12
1.4. Auslegungsprinzipien und elektrischer Leistungsbedarf	13
1.5. Entwicklungsoptionen	14
1.6. Wärmepumpen und Deckung ihres Strombedarfs (Systemüberlegungen)	15
1.6.1. Heizkessel versus dezentrale WKK (BHKW) + Wärmepumpen	16
1.6.2. Heizkessel versus GuD + Wärmepumpen	16
1.6.3. Heizkessel versus dezentrale WKK (BHKW) + Wärmepumpen	18
1.6.4. Heizkessel versus GuD + Wärmepumpen	18
2. Wärmepumpen in den Energieperspektiven	20
2.1. Bisherige Entwicklung in der Schweiz	20
2.2. Grundsätzliche Überlegungen zu den Szenarien	21
2.3. Szenarienergebnisse im Bereich Wohnungen	24
2.4. Auswirkungen auf den Leistungsbedarf bei den WP-beheizten Wohnungen	29
2.5. Entwicklung der Wärmepumpe in allen Sektoren	30

3. Elektrische Widerstandsheizungen	33
--	-----------

4. Literaturverzeichnis	36
--------------------------------	-----------

Abbildungsverzeichnis

Figur 1:	Funktionsprinzip der Kompressionswärmepumpe	5
Figur 2:	Funktionsprinzip der Absorptionswärmepumpe	6
Figur 3:	Funktionsprinzip der Adsorptionswärmepumpe	7
Figur 4:	oberflächennahe Bodentemperatur im Jahresverlauf	11
Figur 5:	Prinzipschema Heizkessel, dezentrale WKK und Wärmepumpen	16
Figur 6:	Prinzipschema Heizkessel, GuD und Wärmepumpen	16
Figur 7:	CO₂-Einsparung von Wärmepumpen mit Stromerzeugung in GuD- oder WKK-Anlagen, verglichen mit konventionellen Heizanlagen mit Energieträger Heizöl	17
Figur 8:	Prinzipschema Heizkessel, dezentrale WKK und Wärmepumpen	18
Figur 9:	Prinzipschema Heizkessel, GuD-Anlagen und Wärmepumpen	18
Figur 11:	Wärmepumpenabsatz Anlagen < 20 kW, bereinigte Zuordnung	21
Figur 12:	Grundsätze der Potenzialermittlung für den Wärmepumpeneinsatz in den Szenarien, schematische Darstellung	24
Figur 13:	zeitliche Entwicklung der Ausschöpfung der szenarienabhängigen erschliessbaren Potenziale, in normierten Einheiten	25
Figur 14:	Anteil von Wärmepumpen an der Beheizung von EZFH-Neubauten	25
Figur 15:	WP-beheizter Wohnungsbestand in den Szenarien I und IV	26
Figur 16:	WP-beheizte Energiebezugsflächen im Sektor Private Haushalte in den Szenarien I und IV	26
Figur 17:	spezifischer Heizwärmeleistungsbedarf der von Wärmepumpen beheizten Wohnungsflächen (Durchschnitt) im Auslegungsfall in den Szenarien I und IV	27
Figur 18:	Endenergieverbrauch aller WP-beheizten Wohnungen in PJ in den Szenarien I und IV	28

Figur 19:	Elektrische Leistung aller im Wohnungsbereich eingesetzten Wärmepumpen im Jahresmittel im Normjahr, in einem normalen Wintermonat, in einem kalten Wintermonat (Auslegungsfall) sowie in einer Kälteperiode in den Szenarien I und IV	29
Figur 20:	Umgebungswärme nach Sektoren und Szenarien in 2035 im Vergleich zu 2000, in PJ	31
Figur 21:	Anteil der Umgebungswärme an der Wärmenachfrage in den Szenarien I-IV in 2035, Vergleich mit 1990 und 2000	31
Figur 21a:	Anteil der erneuerbaren Energien an der Raumwärme in 2000 sowie in den Szenarien I bis IV in 2035	32
Figur 22:	Bestand elektrodirektbeheizter Wohnungen in den Szenarien I und IV, in 1000	34
Figur 23:	Entwicklung des Jahresverbrauchs der elektrischen Widerstandsheizungen in Wohnungen in den Szenarien I und IV, in TWh	34
Figur 24:	Entwicklung des Leistungsbedarfs der elektrischen Widerstandsheizungen in Wohnungen in den Szenarien I und IV in MW	35

1. Physik und Technik der Wärmepumpe

1.1. Physikalische Funktionsprinzipien

Eine Wärmepumpe ist eine Maschine, die Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau unter Aufwand von zusätzlicher, hochwertiger Arbeit auf ein höheres Temperaturniveau transformiert. Die meisten heute verwendeten Wärmepumpen werden dabei von elektrischem Strom angetrieben. Als Antriebsenergie sind aber auch Gas, Diesel und Biomassen möglich.

Beispiele für den Einsatz des Funktionsprinzips:

Kühlschränke: Dem Innenraum wird Wärme unter Energieaufwand entzogen und nach aussen (Rückseite) abgegeben

Gebäudeheizung: Bei der Wärmepumpenheizung wird die Wärme von einem äusseren Medium auf Umgebungstemperaturniveau unter Energieaufwand auf ein zum Heizen geeignetes Temperaturniveau „gepumpt“, ins Innere des Gebäudes gebracht und dort verteilt. Bei heutigen Anlagen ist das „Zielniveau“ i. a. auf Niedertemperaturniveau und die Verteilung erfolgt über Flächenheizsysteme, i. a. Fussbodenheizungen.

Der Einsatz von Wärmepumpen zu Heizungszwecken im Wohnungsbereich kann je nach Funktionsprinzip, Wärmequelle, Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und energetischer Qualität der Gebäudehülle zur vollständigen Deckung (monovalent) des Heizwärmebedarfs (und ggf. des Warmwasserbedarfs) erfolgen oder auf die teilweise Deckung des Wärmebedarfs (bivalent) ausgelegt sein. In diesem Falle ist eine Zusatzheizung zur Deckung der Spitzenlastfälle vorzusehen, die im allgemeinen konventionell ist (Gas, Heizöl, Direktstrom).

Industrielle Verfahren (Kühlung und/ oder Heizung): Bei zahlreichen industriellen Prozessen bietet es sich an, Abwärme zu nutzen und durch Wärmepumpen auf Heizwärmeniveau zu bringen. Auch umgekehrte Verfahren zur Kühlung bieten sich an. Besonders viel versprechend sind derzeit im Industrie- und Dienstleistungssektor Wärmepumpen, die im Winter Heiz- und im Sommer Kühlungsfunktionen erfüllen.

1.1.1. Kompressionswärmepumpe

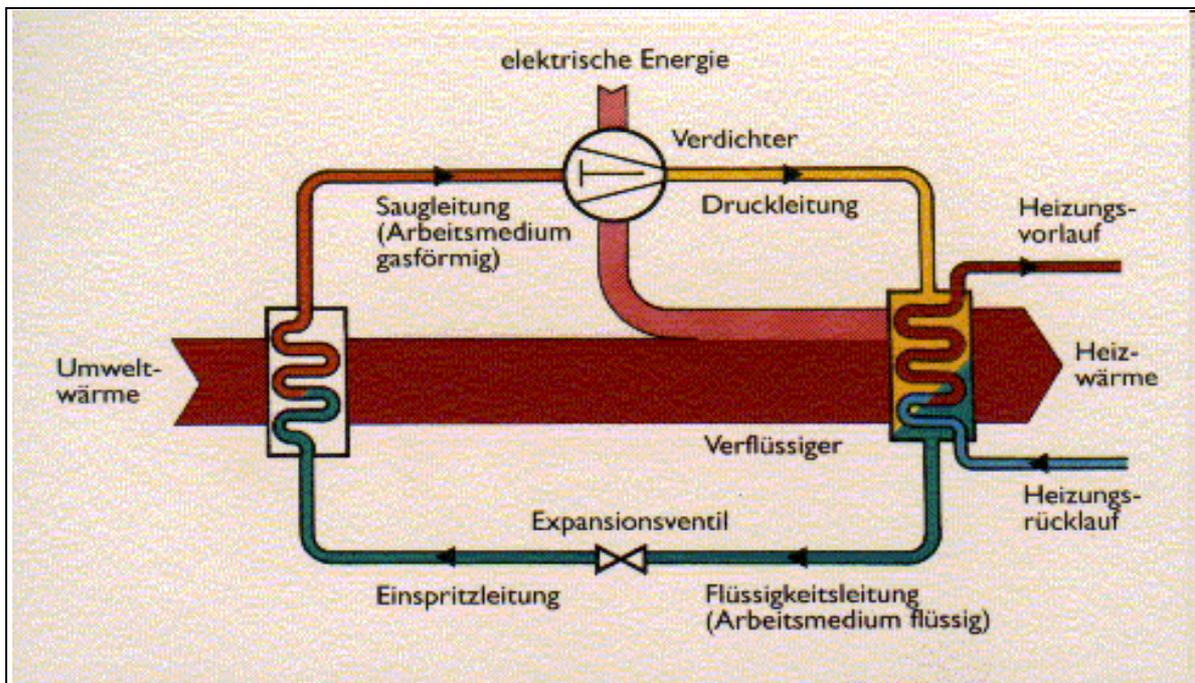
Derzeit sind hauptsächlich Wärmepumpen (WP), die nach dem Kompressionsprinzip arbeiten, im Einsatz. Ihr Antrieb kann elektrisch oder (gas)motorisch erfolgen.

Dieses Prinzip soll hier kurz erläutert werden:

Mit der Wärmepumpe wird in einem Kreislaufprozess ein Arbeitsmedium („Kältemittel“) auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Zum Antrieb des Kompressors wird elektrische Energie verwendet (manchmal auch direkt mechanische Energie oder Erdgas). Das umgekehrte Prinzip wird beim Kühlschrank eingesetzt. Der Kompressor verdichtet das gasförmige Arbeitsmedium. Dabei wird es auf ein höheres Temperaturniveau "gehoben", z.B. auf 50°C. Das so erwärmte Arbeitsmedium gibt seine Wärme an den Heizkreis ab und kondensiert dabei. Das immer noch unter Druck stehende Arbeitsmedium wird über ein Drosselventil entspannt (auf niedrigeren Druck gebracht). Es ist aber noch immer flüssig. Erst die Energie aus der Wärmequelle lässt es im Verdampfer wieder gasförmig werden und der Prozess beginnt von neuem. [1] Mit der Wärmeaufnahme ist eine Abkühlung der Wärmequelle verbunden.

Typische Arbeitsmedien ("Kältemittel") sind z.B. R134a, R404A, R407A/B/C oder R410A, außerdem in zunehmendem Maße Propan (R290, brennbar), Propen (R1270, brennbar), Propan-Butan-Gemische (brennbar), Ammoniak (R717, brennbar) oder Kohlendioxid (R744, nicht brennbar, hohe volumetrische Kälteleistung, geringer Preis), bei Erdreichwärmepumpen Sole (Salzlösungen). Traditionelle Kältemittel stammen aus den Stoffklassen der halogenierten Kohlenwasserstoffe (FKW, FCKW), da diese über für den Wärmepumpenbetrieb besonders erwünschte physikalische Eigenschaften (niedrige Siedepunkte, nicht brennbar, annehmbare Wärmeübergänge und -kapazitäten) verfügen. Zunehmend werden auch nichthalogenierte Kältemittel (Propan, Kohlendioxid) eingesetzt. Die Kohlendioxid-WP ist derzeit im Pilotstadium-

Figur 1: Funktionsprinzip der Kompressionswärmepumpe



Quelle: Stiebel Eltron GmbH & Co. KG

Neben den Kompressionswärmepumpen gibt es noch zwei verschiedene technische Konzepte von Wärmepumpen, diese arbeiten nach dem Absorptionsprinzip bzw. dem Adsorptionsprinzip. Gegenüber der Kompressionswärmepumpe besteht der Unterschied, dass zum Antrieb dieser Wärmepumpen kein elektrischer Strom benötigt wird. Die direkte Verbrennung von Erdgas oder auch von Öl, Kohle oder Biomasse liefert die notwendige Energie.

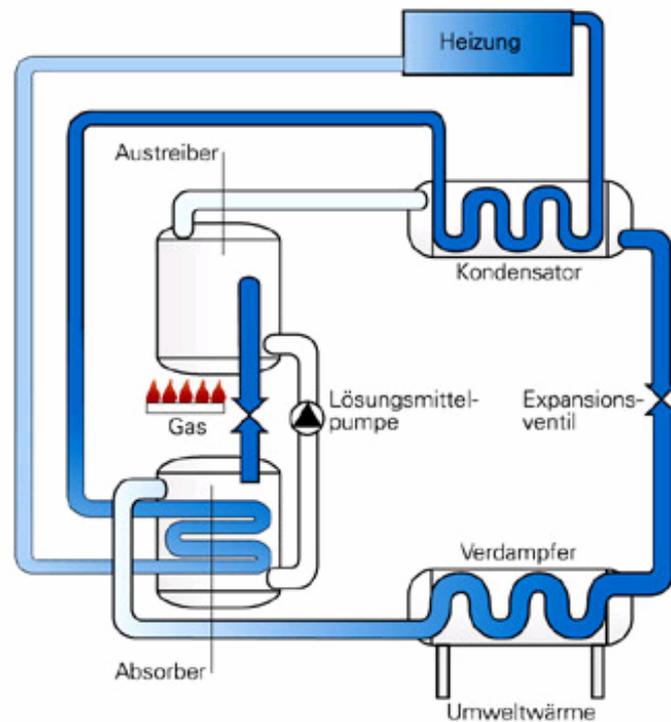
1.1.2. Absorptionswärmepumpe

Chemische Absorption beschreibt den Prozess der Aufnahme oder des „Lösens“ eines Atoms, Moleküls oder eines Ions in einer anderen Phase.

Der Aufbau und die Funktion einer Absorptionswärmepumpe ist analog dem einer Kompressionswärmepumpe. Der mechanische Kompressor ist durch einen thermischen Verdichter, der mit einem Zweistoff-Gemisch arbeitet, ersetzt. Statt das Kältemittel zu komprimieren, wird ein gasförmiges Kältemittel (z. B. Ammoniak) von einem Lösungsmittel (z. B. Wasser) durch einen beheizten thermischen Verdichter in eine kältemittelreiche Lösung (NH₃-Dampf) und eine kältemittelarme Lösung (Wasser) getrennt. Das gasförmige unter Druck stehende NH₃-Kältemittel strömt dann in

den Kondensator (Verflüssiger), gibt die Kondensationswärme an das Heizungssystem ab und wird dadurch flüssig. Danach durchströmt das flüssige, unter hohem Druck stehende Kältemittel ein Reduzierventil. Durch diese Druckentspannung expandiert das Gas, kühlt sich dabei ab und ist so in der Lage, im nachfolgenden Verdampfer Wärme aus der Umwelt aufzunehmen. Heute verwendet man Absorptionswärmepumpen effektiv in Kombination mit Solaranlagen zur Raumkühlung im Sommer in Verbindung mit Kühldecken. [2]

Figur 2: Funktionsprinzip der Absorptionswärmepumpe



Quelle: www.energiespasmobil.de/erneuerbare_energien/waermepumpen.php

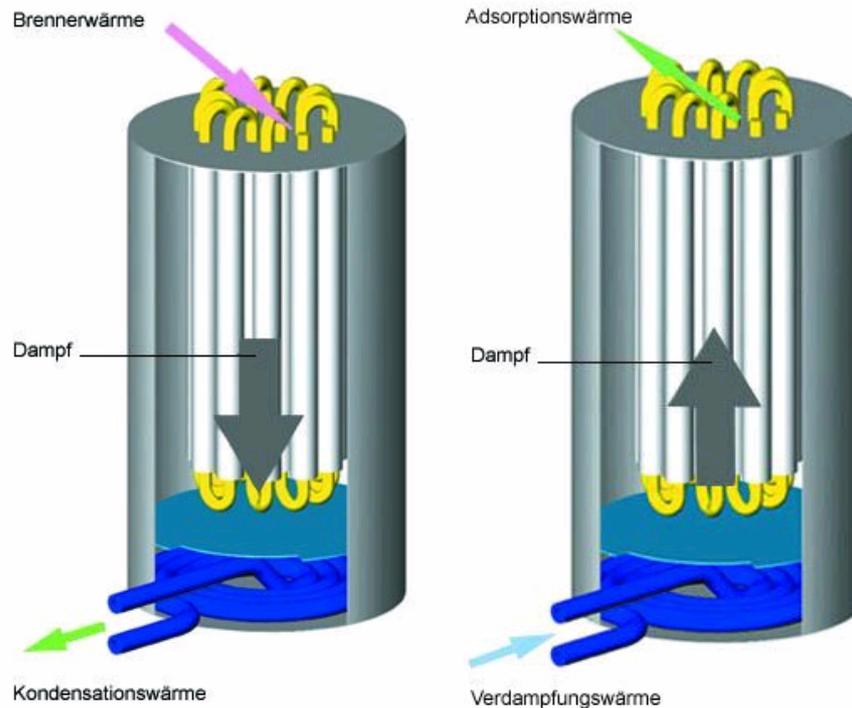
1.1.3. Adsorptionswärmepumpe

Beim Vorgang der Adsorption lagert sich ein Atom oder Molekül aus einem Gas oder einer Flüssigkeit an einer inneren Oberfläche eines Stoffes (Adsorptionsmittel) an. Gängige Adsorptionsmittel sind Bentonit, Kieselgel und Aktivkohle. In dem unten beschriebenen Prozess kommt Zeolith, ein Silikat-Mineral, zum Einsatz.

Die Wärmepumpe besteht aus zwei Modulen. In ihrem oberen Teil befindet sich das Adsorptionsmittel Zeolith. Es ist aufgebracht auf einem Wärmetauscher (Adsorber / Desorber). Unten befindet sich ein weiterer Wärmetauscher (Kondensator / Verdampfer), als Kältemittel ist Wasser enthalten. Der Prozess in den Modulen läuft in zwei Schritten ab: Im ersten Teilschritt wird der Zeolith mit Hilfe eines Brenners auf 200 °C erwärmt. Dabei desorbiert das Wasser und strömt als Dampf in den unteren Teil des Moduls. Hier kondensiert der Dampf und gibt dabei seine Kondensationswärme ab. Dieser Schritt ist beendet, wenn der Zeolith trocken ist und sich das gesamte Wasser im unteren Teil des Moduls befindet. Nun wird der Brenner ausgeschaltet und das Modul kühlt unter Umgebungstemperatur ab. Das Wasser verdampft nun unten im Modul mit Hilfe von kostenloser

Umgebungswärme. Der Dampf strömt in den oberen Teil des Moduls und wird dort vom Zeolith adsorbiert, die dabei frei werdende Adsorptionswärme wird ebenfalls genutzt. Wenn das Wasser vollständig verdampft ist, beginnt der Prozess erneut. [3]

Figur 3: **Funktionsprinzip der Adsorptionswärmepumpe**



Quelle: Vaillant GmbH

1.2. Kenngrößen von Wärmepumpen-Prozessen

Zur Beurteilung der energetischen Effizienz und Performance werden Wärmepumpen mit verschiedenen Kennzahlen charakterisiert.

Leistungszahl ε bzw. coefficient of performance (COP): Diese dimensionslose Größe beschreibt das Verhältnis von erzeugter Heizleistung zu effektiv aufgenommener elektrischer Leistung in einem bestimmten Betriebspunkt. Die aufgenommene elektrische Leistung beinhaltet

- die Leistungsaufnahme für den Betrieb des Verdichters
- die Leistungsaufnahme aller Regel-, Steuer- und Sicherheitssysteme der Wärmepumpeneinheit
- die anteilige Leistungsaufnahme der Arbeitsmittel- bzw. Heizungspumpe zum Transport des Arbeitsmittels bzw. des Heizungswassers innerhalb der Wärmepumpeneinheit.

Der COP ist abhängig von der Temperatur der Wärmequelle sowie von der Zieltemperatur des Heizsystems. Die Leistungszahl bezieht sich auf das Wärmepumpenaggregat und berücksichtigt nicht elektrische Hilfsaggregate, Wärmeverteilung etc. Heutige elektrische Wärmepumpen erreichen Leistungszahlen zwischen 3.5 und 5.5 (je nach Wärmequelle). [4]

Jahresarbeitszahl β (oder JAZ): Diese ebenfalls dimensionslose Kennzahl beschreibt das Verhältnis zwischen der innerhalb eines Jahres erzeugten Wärmeenergie und der jährlich zugeführten elektrischen Arbeit. Sie ist also eine integrierte Grösse und beschreibt die „performance“ des gesamten Systems, gemittelt über verschiedene Betriebszustände.

Heutige durchschnittlich installierte Wärmepumpen weisen eine JAZ von 2.7 bis 3.5 auf. [5].

Dem aktuellen Qualitätsprüfungs-Bericht Kleinwärmepumpen 2005 ist zu entnehmen, dass sich der COP-Verlauf nach anfänglicher Verbesserung in den letzten Jahren (bei Luft-Wasser-WP seit 2000) leicht verschlechtert hat, da aufgrund des Preisdruckes in den Märkten die Wärmepumpen kostenoptimiert und nicht mehr auf die maximale Effizienz hin entwickelt wurden. [6] Neuerdings lässt sich - im Zuge der Marktberreinigung – nach Aussagen des BFE wieder ein Anstieg beobachten.

Die Felderhebungen [5] wurden Ende 2003 abgeschlossen. Im folgenden Jahr startete ein neues, reduziertes Projekt, welches gezielt Wärmepumpen*anlagen* mit möglichst hohen Arbeitszahlen erfasst (so genannte Bestanlagen). Daher ist es schwierig, valide Durchschnitts- und Streubreiten-Aussagen über aktuell installierte Wärmepumpen zu machen.

Grundsätzlich sind aufgrund der Bedingungen der Prozesse (Carnot-Restriktionen in den thermodynamischen Kreisprozessen) Wärmepumpen umso effizienter, je geringer der zu bewältigende Temperaturhub ist. Ideal ist der Einsatz in Objekten mit geringem spezifischem Wärmebedarf (zur Reduzierung des Kollektoraufwands bei den geringen Leistungsdichten der Quellen) sowie Flächenheizungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen. Je grösser die Temperaturspreizung zwischen Quellentemperatur und Nutzttemperatur, desto geringer die Leistungsziffer und damit verbunden die Jahresarbeitszahl. Wenn Wärmepumpen in bestehenden Gebäuden angewendet werden sollen, sind energetische Vollsanierungen mit Sanierungen des Heizungssystems die besten Voraussetzungen. Aufgrund dieses Aufwands muss davon ausgegangen werden, dass der Einsatz im Sanierungsbereich aufgrund der geringen Sanierungsraten und -effizienzen begrenzt bleibt.

Die Leistungszahlen sind umso höher, je geringer der durch die Wärmepumpe zu bewerkstellende Temperaturhub ist. Mit einer thermischen Kaskadierung (dem Hintereinanderschalten mehrerer Stufen mit jeweils für sich kleinen Temperaturintervallen) liessen sich im Prinzip gegenüber dem heutigen Standard deutliche Erhöhungen erzielen. Im industriellen Bereich werden bereits mehrstufige Anlagen angetroffen; im Bereich der Kleinanlagen für die Wohnungsbeheizung lohnt i. a. der Aufwand aus wirtschaftlichen Gründen nicht.

1.3. Wärmequellen

Grundsätzlich lassen sich für Wärmepumpen eine Vielzahl von Niedertemperatur-Wärmequellen nutzen. Zu den gängigsten zählen:

- Aussenluft
- Innen-Abluft (vor allem bei Gebäuden mit sehr geringem Heizwärmebedarf wie Minergie-P-Standard)
- oberflächennahes Erdreich (mit Flächenkollektoren oder Erdwärmesonden erschliessbar)
- Grundwasser
- Oberflächenwasser (Seen, Flüsse)
- industrielle Abwärmequellen
- Abwasser (aus Abwasserkanälen oder gereinigt nach ARA)
- (gespeicherte) Niedertemperatur-Solarwärme [vor allem bei saisonalen Nahwärme-] Anwendungsfällen.

Für den grössten Anwendungsfall „Heizen und Warmwasserbereitung“ spielen die Quellen Aussenluft und Erdwärmesonden die Hauptrollen. Perspektivisch wird bei deutlich verbesserten Gebäudestandards die Innenluft als Wärmequelle an Gewicht gewinnen.

Damit die Wärmequellen für den dauerhaften Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung stehen und nicht allmählich auskühlen, ist die jeweilige Leistungsdichte und Regenerationsfähigkeit bei der Auslegung zu berücksichtigen.

1.3.1. Aussenluft und Abluft als Wärmequelle

Bei Aussenluft als Wärmequelle stellt sich nicht die Frage der Regeneration (die Luft wird angesaugt, abgekühlt und wieder abgegeben). Die Leistungsdichte der Wärmequelle ist naturgemäss temperaturabhängig sowie abhängig vom verwendeten Kältemittel.

Bei monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpen gilt: Die Heizleistung nimmt mit Sinkender Aussen-temperatur ab. Bivalente Luft-Wasser-WP weisen üblicherweise einen Umschalt- punkt zwischen 0 und +5° C auf. Damit können – in einem normalen Winter – ca. 80 (-max.90)% der Jahresarbeit erbracht werden. Die WP wird entsprechend nicht auf die Spitzenlast ausgelegt (Kessel: 100% Auslegung).

- Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle waren vorerst häufig bivalent konzipiert; die neueren Anlagen werden in aller Regel bis zur minimalen Auslegungstemperatur einer Heizung nach SIA 384/2 (Mittelland –8°C) monovalent betrieben. Sie sind oft zusätzlich mit einem elektrischen Heizstab ausgestattet, der nach Aussage des BFE in Neubauten vorwiegend während der Bauaustrocknung mit in Betrieb steht und als Frostsicherung bei einem allfälligen Ausfall der Wärmepumpe dient. Die Elektro-Heizstäbe benötigen nach FAWA [5] etwa 1,5% des gesamten Stroms der Wärmepumpenanlagen. Unterhalb der

Auslegungstemperatur von -8 °C ist eine volle Deckung des Heizleistungsbedarfs nicht garantiert.

- Praxiserfahrungen und FAWA [5] zeigen, dass eine Auslegung auf -8 °C nach SIA 384/2 eine volle Deckung des Wärmebedarfs bis $-10\text{ ...}-15\text{ °C}$ ergeben – je nach Gebäudetyp und Benutzerverhalten.

Energetisch günstig ist es, wenn statt kühler Aussenluft raumwarme Abluft als Wärmequelle genutzt werden kann. Dies wird beim Prinzip der Abluft-Wärmepumpe, vor allem in Passivhäusern mit kontrollierter Lüftung, genutzt. Zu beheizen oder vorzuwärmen ist dann die einströmende kühle Aussenluft. Solche Systeme sind ideal für Passivhäuser mit sehr geringem Energiebedarf.

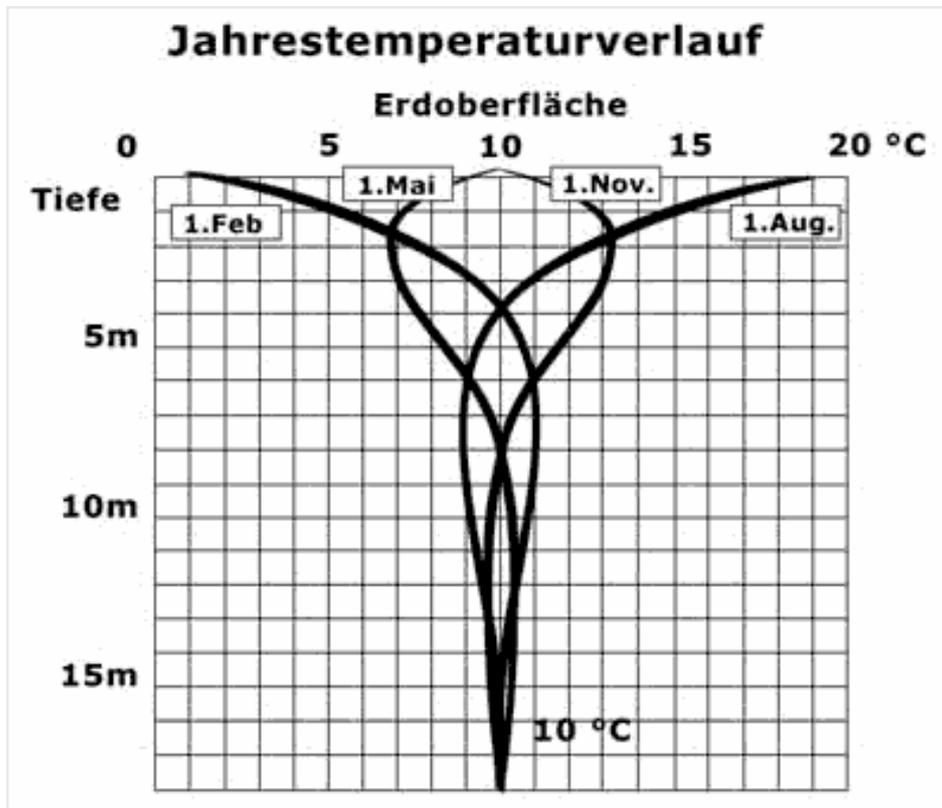
1.3.2. Oberflächennahes Erdreich

Es gibt grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten, das oberflächennahe Erdreich als Wärmequelle zu nutzen: Die Verlegung von flächigen „Kollektoren“ (Erdregister) aus korrosionsbeständigen Schläuchen in einer Tiefe von ca. $1.20 - 1.50\text{ m}$ kann bei geeigneten geographischen Bodenverhältnissen kostengünstig sein. Die Bedingung für die Regenerationsfähigkeit bedeutet hier, dass der Boden im Sommer durch Sonneneinstrahlung und Wärmeübergang mit der Luft wieder genügend Wärme aufnehmen (und durch Wärmediffusion bis zur Kollektortiefe leiten) muss, um die Anfangstemperatur wieder herzustellen. Diese Bedingung begrenzt die Dichte der zu entnehmenden Kälteleistung. Abgesehen davon ist eine zu starke Auskühlung des Bodens auch aus Gründen der kurzfristigen Funktionsfähigkeit und Effizienz der Wärmepumpe zu vermeiden, da Unterschreitungen des Gefrierpunktes und Vereisungen Leistungszahl und Jahresarbeitszahl massiv verringern. (Das bedeutet insbesondere eine höhere Nachfrage an elektrischem Strom und Leistungsbelastung auf der Kraftwerksseite, vgl. 1.3.) Je nach Bodenqualität können unter der Bedingung der Aufrechterhaltung der Regenerationsfähigkeit Kälteleistungen von ca. $10 - 30\text{ W/m}^2$ bei genügend Abstand zwischen den einzelnen Schläuchen erzielt werden. Bei einem modernen Neubaustandard (ca. 40 W/m^2 beim EFH) bedeutet dies, dass für eine Einheit (m^2) zu beheizende Fläche jeweils 2.4 Einheiten (m^2) Wärmetauscherfläche vorgesehen werden müssen. An dieser Stelle erschliesst sich unmittelbar, dass es in jedem Falle vorteilhaft sein kann, die benötigte Heizleistung durch gebäudeseitige Massnahmen zu reduzieren.

Erdkollektoren werden wegen des Flächenbedarfs vor allem bei freistehenden Ein- und Zweifamilienhäusern eingesetzt. Sie spielen in der Schweiz, wegen in der Regel nicht ausreichender Flächen, eine sehr untergeordnete Rolle.

Weil meistens nicht genügend Fläche zur Verfügung steht, werden häufiger Erdsonden mit senkrechten Bohrungen eingesetzt. Bei diesen liegt je nach Bodenqualität die mögliche Leistungsdichte bei ca. $30 - 55\text{ W/m}$ Sondenlänge. Je m^2 Energiebezugsfläche auf normalem Neubaustandard (40 W/m^2) sind somit ca. $0.70 - 1.30\text{ m}$ Sondenlänge zu rechnen. Der Abstand zweier Entnahmesonden muss mindestens 5 m betragen, um eine gegenseitige Beeinflussung, Auskühlung und Wirkungsgradverluste zu vermeiden. [8]

Figur 4: oberflächennahe Bodentemperatur im Jahresverlauf



Quelle: <http://www.teramex.de/images/jahrestemperaturverlauf.gif>

Da unterhalb einer Tiefe von 20 m kein saisonaler thermischer Einfluss der Sonneneinstrahlung mehr nachzuweisen ist, kommen nur Diffusion oder Bewegung im Grundwasserleiter, falls die Sonde einen solchen durchstösst, sowie Wärmeleitung des geothermischen Wärmestroms aus der Tiefe als mögliche treibende physikalische Prozesse für die Regeneration in Frage.

Der geothermische Wärmestrom aus dem Erdinneren an die Oberfläche beträgt gemittelt ca. 60-70 mW/m², d.h. innerhalb eines Jahres sind aus diesem Strom 0.55-0.61 kWh / m² „gewinnbar“ [9]. Damit wird deutlich, dass bei Tiefenbohrungen unterhalb von 20 m im allgemeinen langfristig eine Auskühlung stattfindet. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass je nach tektonischen und geologischen Gegebenheiten im Untergrund der lokale Wärmestrom ein Vielfaches betragen kann. D.h. in Einzelfällen können tatsächlich höhere Temperaturniveaus und Wärmeströme im Untergrund vorliegen, die „echte“ Geothermie darstellen und durch Wärmepumpen angezapft werden können, falls sie nicht über hinreichend hohe Temperaturen für die Direktnutzung verfügen. Letzteres ist bei den gängigen Tiefen für WP-Erdsonden jedoch eher unwahrscheinlich.

Grundsätzlich können Erdsonden – z.B. auch integriert in Fundamente – bei grösseren Gebäuden eingesetzt werden, wenn nicht genügend Fläche für Erdkollektoren vorhanden ist; hier bestehen allerdings Unsicherheiten in Fragen der thermischen Eigenschaften des Untergrunds sowie der Regenerationsfähigkeit bei tiefen Bohrungen. In urbanen (bereits bebauten) Regionen sind die Möglichkeiten von Bohrungen aufgrund der bereits vorhandenen Infrastruktur (Kanäle, Elektrizitäts- und Telekommunikationsversorgung) eingeschränkt.

Die Regeneration ist gesichert, wenn die (Absorptions-)Wärmepumpen im Sommer „umgekehrt“ laufen, zur Gebäudekühlung beitragen und die überschüssige Wärme wiederum ins Erdreich einspeisen. Solche kombinierten Heiz/Kühl-Wärmepumpen werden insbesondere für Dienstleistungsgebäude auch wirtschaftlich immer attraktiver. Es wird mit einer Diffusionszeit von einigen Jahren gerechnet, bis sich die technisch-wirtschaftlichen Optima der Auslegungsprinzipien bei der Umsetzung durchgesetzt haben.

1.3.3. Oberflächenwasser, Grundwasser, Abwasser

Abwasser

Da im Abwasser von Gebäuden (sowohl im Sektor Haushalte als auch Dienstleistungen und Industrie) ein Teil der Gebäudewärme ungenutzt verloren geht und die Wärmekapazität von Wasser im Vergleich zu der von Luft oder Boden sehr viel höher ist, kommt es als Wärmequelle ebenfalls in Frage. Eine im Auftrag des BFE durchgeführte Untersuchung zeigt, dass die Nutzung des gesamten Abwasseraufkommens der Schweiz (Siedlungs- und Industrie- sowie Dienstleistungsabwasser) mit Wärmepumpen zur Bereitstellung des Warmwasserbedarfs von 900'000 Haushalten ausreicht; bei einer Umrechnung auf den Heizungsbedarf wären es – grob gerechnet und lediglich auf die Heizenergie bezogen - knapp 200'000 Haushalte. Diese Rechnung ist integral und überschlägig und würde voraussetzen, dass die Abwasserwärme jeweils an der Kläranlage „eingesammelt“ wird und zur Verteilung eine entsprechende Fern- und Nahwärmeinfrastruktur vorhanden ist. [10]

In einer spezifischen Leistungsbetrachtung kann das von einem Bürger durchschnittlich erzeugte Abwasser (incl. des umgerechneten Anteils von Industrie und Dienstleistungen) über Wärmepumpennutzung zu 2.73 % seines Heizleistungsbedarfs beitragen.

Grund- und Oberflächenwasser

Grundsätzlich ist die Nutzung von Grundwasser nur im Rahmen der Regenerationsfähigkeit und ausserhalb der Schutzzone S zulässig. Es bestehen zudem Restriktionen in Bezug auf Abkühlung und potenziellen Kontakt mit Kältemitteln im Falle von Lecks oder Unfällen, z. T. sind einige Kältemittel grundsätzlich nicht gestattet. Grundwasser mit einer Temperatur von 9 - 12 °C lässt eine grössere Wärmeentnahme zu (lässt sich stärker abkühlen) als Oberflächenwasser (im Winter!) mit 0 - 4 °C.

Grund- und Oberflächenwasser besitzen daher Leistungsdichten in den folgenden Korridoren:

Grundwasser ca. 5 - 7 W*h/l; entspricht 150 - 200 l/h*kW_{th}

Oberflächenwasser: ca. 2.5 - 3.3 W*h/l, entspricht ca. 300 - 400 l/h*kW_{th}

Umgerechnet auf den Wärmeleistungsbedarf heutiger Neubauten bedeutet dies für den benötigten Durchfluss

Grundwasser 8l/h je m² Energiebezugsfläche

Oberflächenwasser 16 l/h je m² Energiebezugsfläche.

Die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser bietet sich bei entsprechender Lage an; die bisherige Nutzung erfolgt zumeist bei günstig gelegenen Einzelobjekten (z.B. öffentliche Bauten, Hotels).

1.4. Auslegungsprinzipien und elektrischer Leistungsbedarf

Wärmepumpen zu Heizungszwecken werden wie alle anderen Heizungsanlagen auf einen definierten Höchstlastfall dimensioniert. Grundlage dafür ist SIA 384/2. Sie legt die Raumtemperaturen und die minimale Aussentemperatur für die maximale Heizleistung fest. Im Mittelland wird danach bei einer Aussentemperatur von -8 °C eine Innentemperatur von 20 °C erreicht und gehalten. Aus dieser Anforderung und der energetischen Qualität der jeweiligen Gebäudehülle bestimmt sich die benötigte Wärmeleistung und daraus über die Leistungszahl auch die elektrische Leistung.

Tab.1: **Typische Auslegungsfälle von monovalenten Wärmepumpen:**

Haustyp, m ² EBF	Heizleistung (Auslegungsleistung) in kW _{th}	Elektrische Leistung der WP, in kW _{el}
Neues EFH, 140 m ²	5.6	2.0
Neues MFH, 1'000 m ²	30	10.0
EFH Bestand, 140 m ²	11.2	3.8
MFH Bestand, 1'000 m ²	66	22

Bei bivalenten Wärmepumpen (heute nur noch bei Anlagen > 50 kW_{th} relevant) können die Leistungen entsprechend, je nach zu erzielendem Anteil der Arbeit, auf 50 – 80 % reduziert werden. Der durch die Wärmepumpe dann nicht abgedeckte Heizwärmebedarf wird über andere Quellen (samt Anlagentechnik) bereitgestellt (und für die Energieperspektiven in der Bilanz entsprechend verbucht).

In den meisten Versorgungsgebieten werden Wärmepumpen mit (vom EVU betriebswirtschaftlichen gerechneten günstigen) Elektrizitätstarifen versorgt, die mit der Bedingung verknüpft sind, dass die Wärmepumpe in Spitzenzeiten für eine gewisse Zeit (bis zu 3x2 Stunden am Tag) von aussen abgeschaltet werden darf. In solchen Fällen muss die Leistung der Wärmepumpe entsprechend höher ausgelegt werden, damit sie im Auslegungsfall in kürzerer Zeit (18 statt 24 Stunden je Tag) die benötigte Arbeit zur Verfügung stellen kann. Entsprechend muss auch ein Pufferspeicher dimensioniert sein.

Kompressions-Wärmepumpen mit elektrischem Antrieb werden aufgrund der technischen und thermodynamischen Systemeigenschaften (Kompressor) getaktet (und nicht kontinuierlich proportional zum Heizleistungsbedarf geregelt). D.h., dass in Zeiten geringerer Heizwärmebedarfe die WP in Intervallen läuft und den Pufferspeicher lädt, z. T. mit besserer Leistungszahl als im Auslegungsfall, je nach Temperatur der Wärmequelle. Während der Laufzeiten beansprucht sie das Netz jedoch immer mit der gleichen Leistung.

Für die Betrachtung der Energieperspektiven bedeutet dies, dass sich entsprechend der jeweiligen benötigten Tages-Laufzeit die Gleichzeitigkeitsfaktoren für die installierten Wärmepumpen verändern und dadurch in Übergangszeiten die durch die Wärmepumpen benötigte mittlere Netzlast reduziert wird. In kalten Perioden – bei idealer Auslegung – erreichen (mit Berücksichtigung üblicher Sperrzeiten) die Gleichzeitigkeitsfaktoren jedoch nahezu 100 %. Falls Lastabwurfsverträge unterstellt werden, reduzieren sich die Gleichzeitigkeitsfaktoren auf bis zu 75 % (je nach Vertragsannahme) – da die Leistung aufgrund des oben Gesagten jedoch entsprechend erhöht werden muss, ändert sich an der gesamten aus dem Netz bezogenen Leistung nichts.

Anlagen <20 kW für den Wohnungsbereich und kleine DL-Gebäude sind im Neubaubereich derzeit knapp – unter der Voraussetzung von speziellen (günstigen) Tarifen für den bezogenen Strom - konkurrenzfähig. Bei normalen Haushaltsstromtarifen sind die Wärme-Vollkosten höher als bei Gas- oder Ölheizungen. Grossanlagen sind besonders dann günstig, wenn sie die sommerliche Kühlung mit erledigen können (vgl. Kap. 1.3.2).

1.5. Entwicklungsoptionen

Klein-WP erscheinen derzeit bereits ziemlich ausgereift und sind serienmässig verfügbar. Die Leistungs- und Jahresarbeitszahlen können bei entsprechenden Anreizen noch steigen – wir unterstellen bei den JAZ bis zu 4.5 bis 2035 (in der breiten Umsetzung, nicht im Pilot- und Demo-Betrieb!), bei den Leistungsziffern bis ca. 5.5.

Gross-WP entwickeln sich allmählich zur Marktreife, sowohl denkbar für MFH als auch für Nahwärmesysteme, dies insbesondere für Fälle mit günstigen Wärmequellen (Oberflächenwasser, gute Voraussetzungen beim Untergrund). Feldstudien über mittlere Jahresarbeitszahlen bleiben abzuwarten, die Entwicklung der langfristigen Belastung der Quellen ebenfalls. Auch wirtschaftlich interessant sind sie heute schon dort, wo ein (DL-) Gebäude mit hoher Auslastung im Sommer gekühlt werden muss. Die Wärmepumpe kann dies übernehmen und eine separate Klimaanlage („Doppelinvestition“) wird vermeidbar.

Gas-Wärmepumpen für den Bereich von Grossobjekten (ca. 100 kW und darüber) werden für Einzelobjekte sowohl im Bereich des grossen Wohnungsbaus als auch entsprechender Gewerbeobjekte erwartet.

Eine interessante Option bietet WKK in Kopplung mit Absorptions- bzw. Adsorptionswärmepumpen für die sommerliche Kühlung von Gewerbe- und Industrieliegenschaften (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung), da dies eine Möglichkeit zum sommerlichen Absatz der von der WKK-Anlage produzierten Wärme ist. Unter solchen Bedingungen kann die WKK-Anlage ggf. grösser ausgelegt werden als im vorrangigen Winterbetrieb, da die sommerliche Wärmegrundlast nicht mehr der begrenzende Faktor ist.

Wärmepumpen mit CO₂ als Kältemittel versprechen möglicherweise hohe Vorlauftemperaturen (und damit Einsatzfähigkeiten im Bereich der Brauchwarmwasserbereitung grosser Objekte). Sie befinden sich jedoch derzeit noch in der Pilot- und Testphase (Markteinführung 2007/2008); über Kennziffern oder Performance können noch keine (statistisch) belastbaren Aussagen gemacht werden. [11], [12].

1.6. Wärmepumpen und Deckung ihres Strombedarfs (Systemüberlegungen)

Autor dieses Kapitels ist H.-U. Schärer, BFE. Die Grundlage dieses Kapitels ist [16]. Die hier angestellten Überlegungen beziehen sich auf die benötigte Arbeit im Jahresintegral, nicht auf die Leistung oder (zeitliche) Verfügbarkeitsfragen. Die in diesem Abschnitt in den Grafiken angeführten Zahlenbeispiele sind Ergebnisse von Grundsatzüberlegungen auf der Basis von Wirkungsgraden und Jahresarbeitszahlen, die sich auf ideale Situationen ohne Potenzialeinschränkungen (gem. S. 21 ff.) beziehen. Sie sind nicht Ergebnisse der Modellrechnungen der Perspektiven.

Bei den erwartbaren grossen Wachstumsraten der Wärmepumpen sind die Wärmequellen generell keine begrenzenden Faktoren. Hingegen stellt sich trotz weiterer, markanter technologischer Fortschritte bei der Wärmepumpen-Effizienz zunehmend auch die Frage, wo der für den Betrieb erforderliche Strom herkommen muss und wie die Gesamtbilanzen von Wärmepumpen und Kraftwerk aussehen.

Ein gewisses Potenzial ergibt sich aus dem Ersatz von Elektro-Widerstandsheizungen durch Wärmepumpen. Das wird in Kapitel 3 für die verschiedenen Szenarien abgeschätzt.

Natürlich wird der zusätzliche Wärmepumpenstrom aus dem bestehenden resp. künftigen Kraftwerkspark stammen. Denkbar ist aber, dass je nach Angebotsvariante explizit für Wärmepumpen Kraftwerkskapazitäten bereit gestellt werden. Aus heutiger Sicht stehen dafür (fossile) Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder reine GuD im Vordergrund.

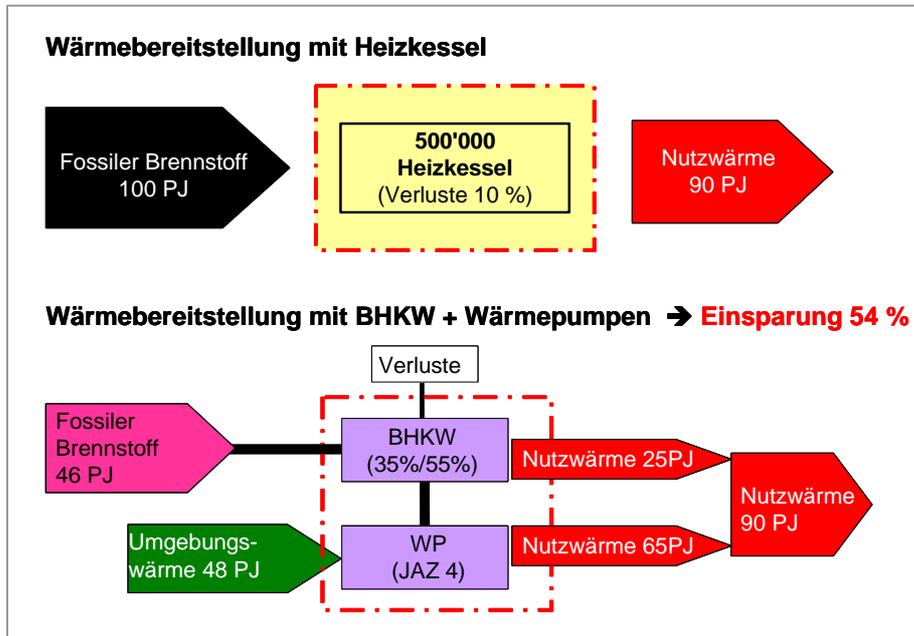
a) Ziel maximale Primärenergie-Einsparung

Für diese beiden Kraftwerkstypen ist im folgenden mit typischen Werten dargestellt, wie sich der Primärenergieverbrauch bei diesen Kombinationen Kraftwerk – Wärmepumpen im Vergleich zur – in den Szenarien dargestellten - getrennten Strom- und Wärmeerzeugung ausnimmt.

Dazu die folgenden grafischen Darstellungen für getrennte resp. kombinierte Anlagen:

1.6.1. Heizkessel versus dezentrale WKK (BHKW) + Wärmepumpen

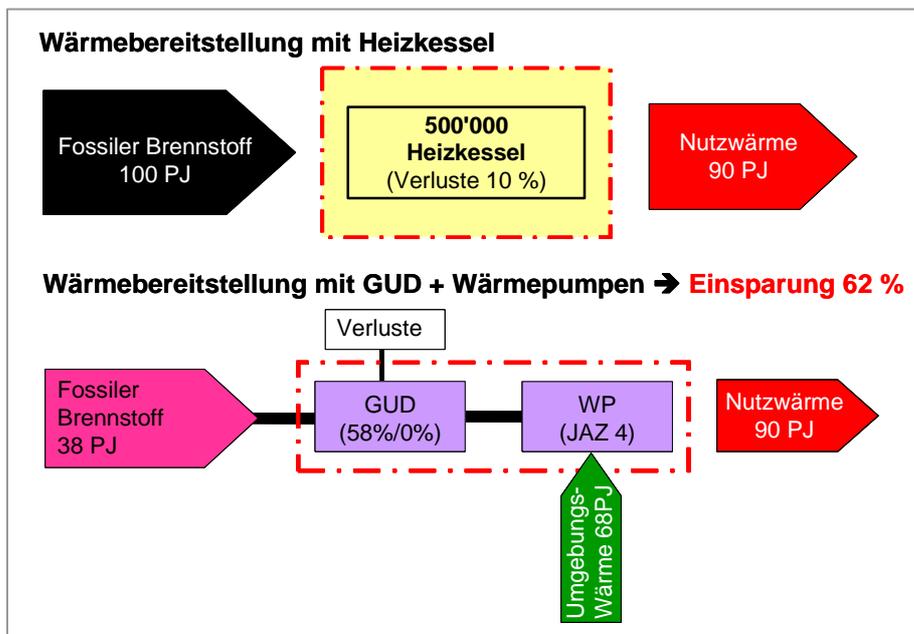
Figur 5: Prinzipschema Heizkessel, dezentrale WKK und Wärmepumpen



Grafik und Daten: BFE

1.6.2. Heizkessel versus GuD + Wärmepumpen

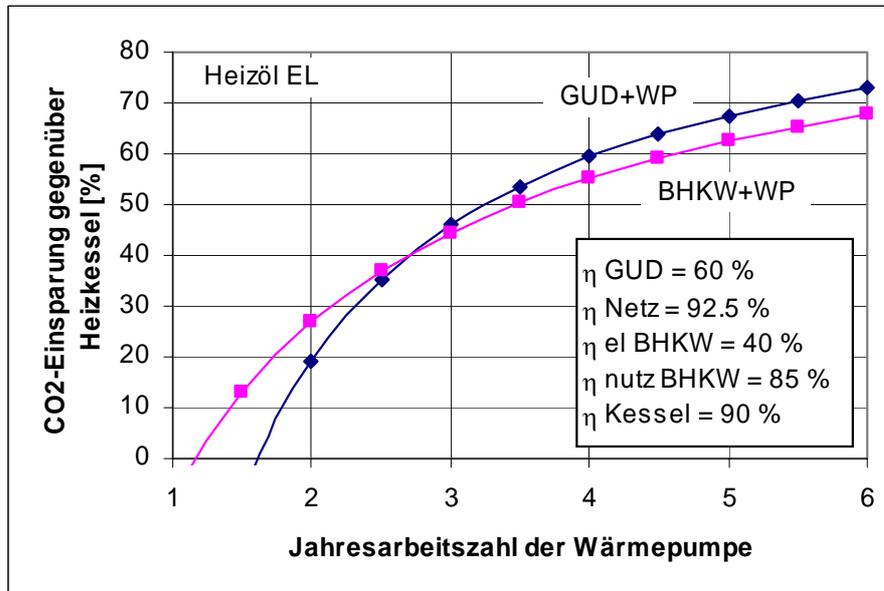
Figur 6: Prinzipschema Heizkessel, GuD und Wärmepumpen



Grafik und Daten: BFE

Die folgende Grafik zeigt Einsparpotenziale an CO₂ der beiden Kraftwerkstypen bei voller Nutzung des Stroms durch Wärmepumpen in Abhängigkeit der Wärmepumpen-Jahresarbeitszahl:

Figur 7: **CO₂-Einsparung von Wärmepumpen mit Stromerzeugung in GuD- oder WKK-Anlagen, verglichen mit konventionellen Heizanlagen mit Energieträger Heizöl**



Quelle: BFE Bericht
Gross-Wärmepumpen

Fazit 1: In der Kombination von dezentraler WKK (BHKW) oder GuD mit Wärmepumpen - bei voller Nutzung des in solchen dezentralen oder zentralen Kraftwerkstypen erzeugten Stroms - kann gegenüber reinen Heizkesseln mehr als 50% Primärenergie für das Heizen eingespart werden.

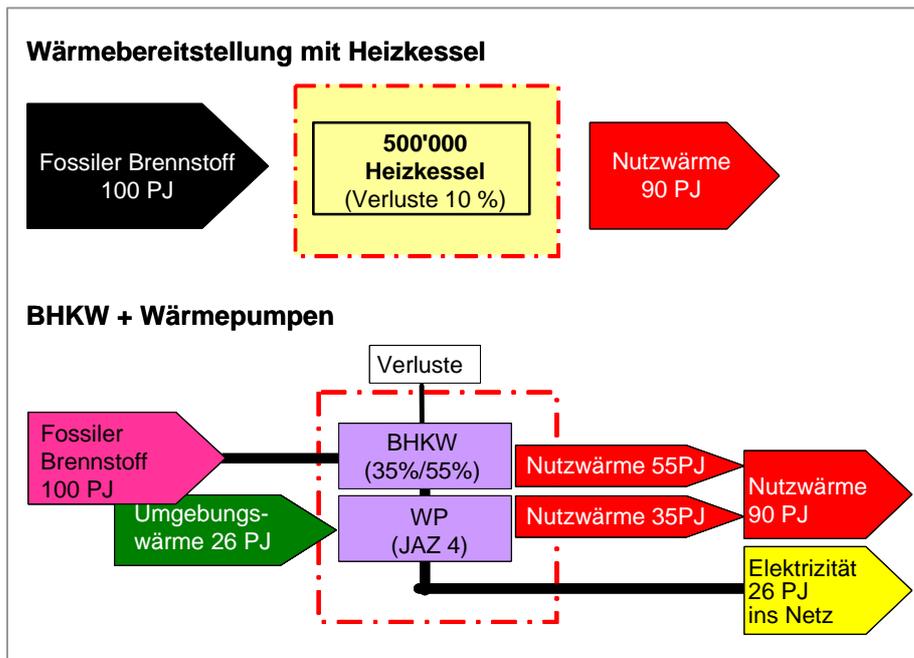
Fazit 2: Bau und Betrieb von dezentralen WKK oder von GuD allein zur Produktion von Strom für den Antrieb von Wärmepumpen ist mit Blick auf die Primärenergie-Einsparung des Systems von über 50% zu befürworten.

b) Ziel CO₂-neutrale fossile Stromproduktion

Anstatt auf maximale Primärenergie-Einsparung zu zielen kann auch angestrebt werden, künftige fossile Kraftwerke (BHKW oder/und GuD) im Bilanzgebiet Schweiz mindestens CO₂-neutral zu betreiben. Das wäre natürlich mit einer CO₂-Abscheidung möglich – aber auch in Verbindung mit Wärmepumpen, wie die folgenden Grafiken zeigen. Dabei wird die Frage beantwortet, welche Strom-Anteile aus den BHKW resp. GuD für Wärmepumpen als Ersatz von reinen fossilen Heizkesseln abzuzweigen sind, damit der darüber hinaus „freie“ Strom (-> „Netto“-Nutzungsgrad) gerade noch ohne zusätzliche CO₂ Belastung zu erhalten ist.

1.6.3. Heizkessel versus dezentrale WKK (BHKW) + Wärmepumpen

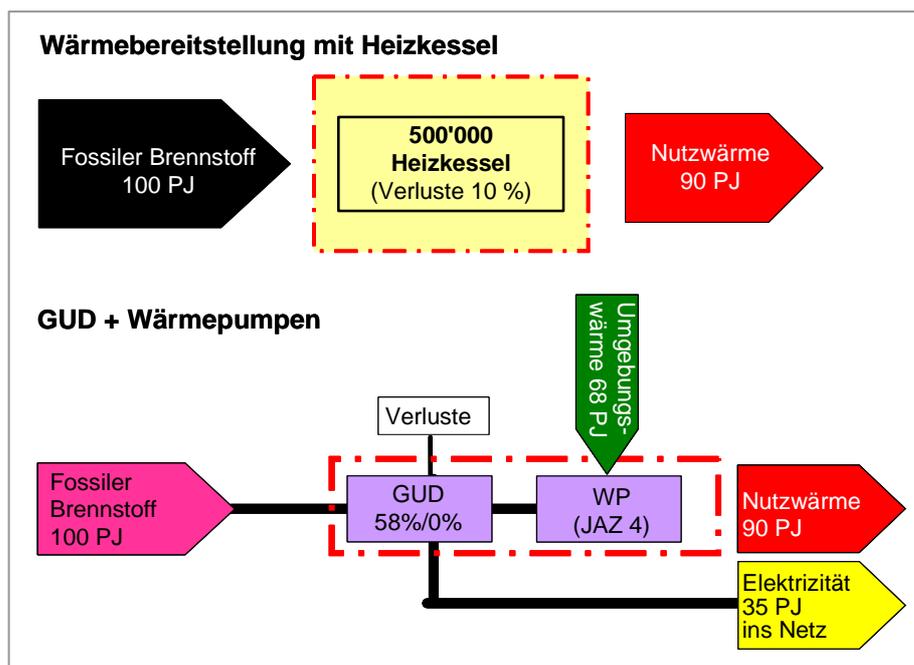
Figur 8: Prinzipschema Heizkessel, dezentrale WKK und Wärmepumpen



Grafik und Daten: BFE

1.6.4 Heizkessel versus GuD + Wärmepumpen

Figur 9: Prinzipschema Heizkessel, GuD-Anlagen und Wärmepumpen



Grafik und Daten: BFE

Fazit 3: Um fossile BHKW in der Schweiz CO₂-neutral betreiben zu können, muss typischerweise 30% des in diesen BHKW produzierten Stroms für Wärmepumpen eingesetzt werden; frei verfügbar bleiben noch rund 70% - der elektrische „Netto“-Nutzungsgrad der BHKW beträgt dann noch rund 25%

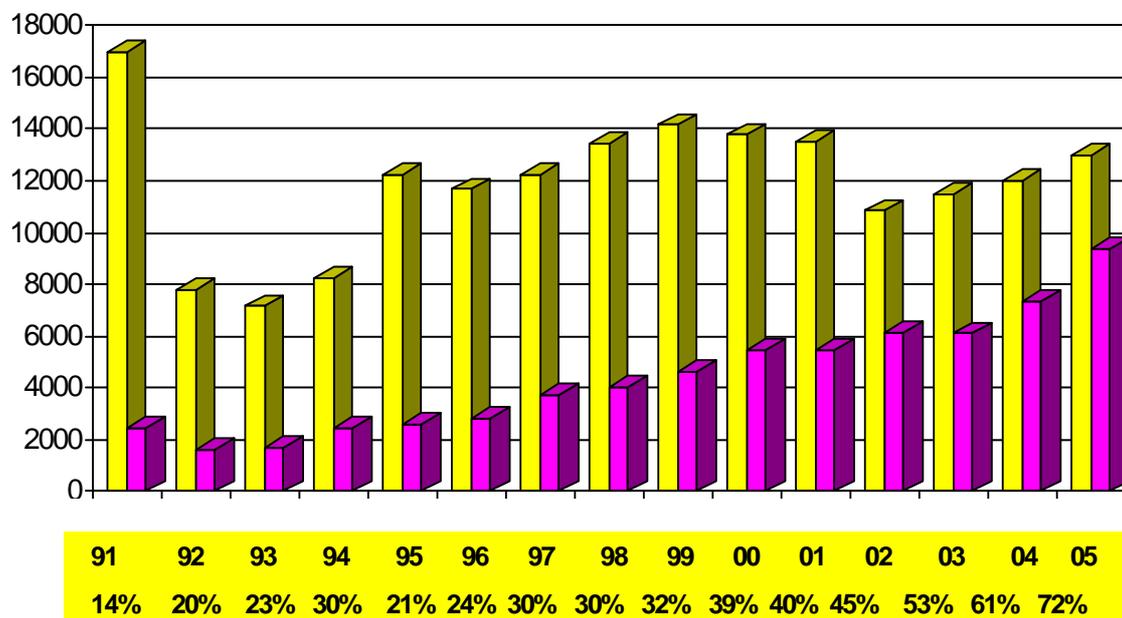
Fazit 4: Um gasbetriebene GuD in der Schweiz CO₂-neutral betreiben zu können, müssen ca. 39 % des produzierten Stroms für Wärmepumpen abgezweigt werden; frei verfügbar sind noch etwa 61% - der „Netto“-Nutzungsgrad des GuD beträgt noch gut 35%.

2. Wärmepumpen in den Energieperspektiven

2.1. Bisherige Entwicklung in der Schweiz

Die Wärmepumpenstatistik verzeichnet vor allem einen seit 1995 kontinuierlich steigenden Absatz von Kleinanlagen.

Figur 10: **Wärmepumpenabsatz Anlagen < 20 kW und Anteil an neugebauten Einfamilienhäusern**



Quelle: Fördergemeinschaft Wärmepumpe Schweiz

In Figur 10 bezeichnen die gelben Säulen die im jeweiligen Bezugsjahr gebauten Einfamilienhäuser, die violetten Säulen den Absatz von Wärmepumpen < 20 kW. Die Prozentangaben sind der von der FGW berechnete Quotient aus beiden Angaben.

Die ausgewiesene bzw. oft genannte Neubauquote von rund 70% in EFH in 2005 (WP < 20 kW) unterstellt, dass alle abgesetzten Wärmepumpen in den Wohnungssektor gehen. Nach CEPE (Aebischer) gibt es auch im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen eine Menge kleiner Gebäude, die ebenso wie im EFH-Bereich mit Wärmepumpen beheizt werden. Allerdings liegen hier keine quantitativen Angaben vor.

In der Wärmepumpenstatistik des BFE erscheinen 2005 alle für den Neubau abgesetzten Wärmepumpen (9'399) auch unter der Grössenklasse <20kW. Der tatsächliche Absatz in dieser Grössenklasse dürfte niedriger sein (um 600 - 650). Dies reduziert den „Neubauanteil“ in Einfamilienhäusern.

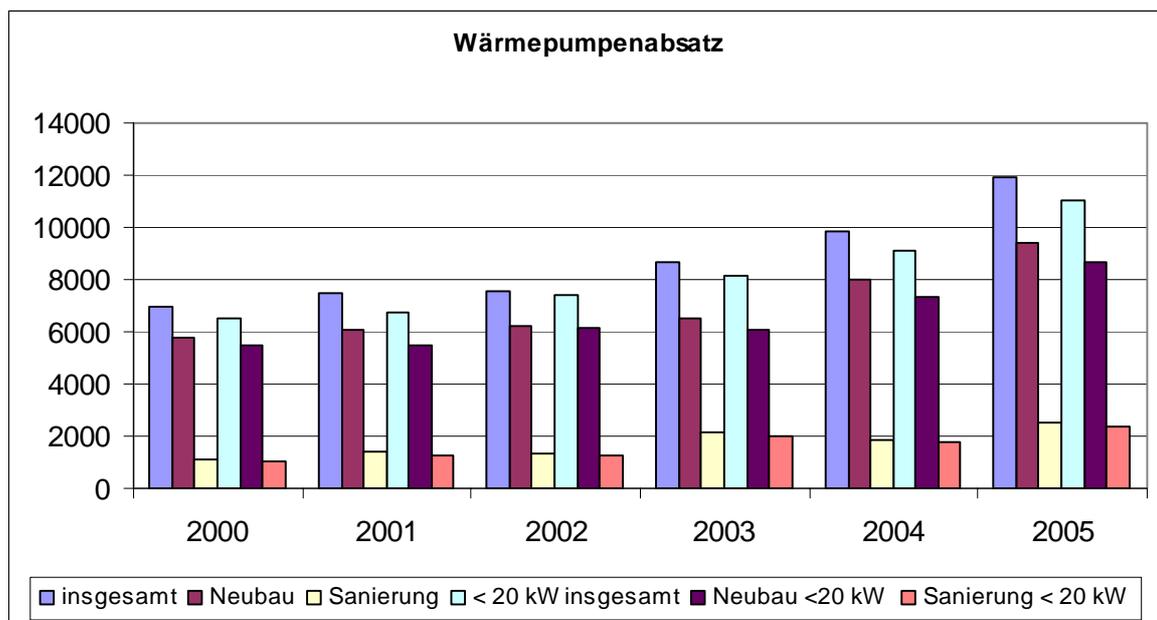
Bei der Berechnung des Neubauanteils (Wärmepumpen < 20kW, bezogen auf die neu erstellten Einfamilienhäuser) liegt der 2005er Wert deshalb zu hoch.

Prognos modelliert Ein- und Zweifamilienhäuser in einer Kategorie. Enthalten sind in den Zugangszahlen die neu erstellten Ein- und Zweifamilienhäuser wie auch die Bruttoumbaugewinne, da diese in energetischer Hinsicht den neu erstellten Gebäuden entsprechen. Ausserdem werden die Substitutionsgewinne (bei der Umstellung der Heizanlage auf andere Heizsysteme und/oder Energieträger) separat betrachtet und nicht dem Neubau (und auch nicht der Sanierung) zugerechnet. Daneben wird der notwendige Ersatzbedarf abgezogen.

Bezüglich des Ersatzbedarfes (WP < 20 kW) liegt das BFE-Niveau auf weniger als einem Drittel des Ersatzbedarfsniveaus der alten Wärmepumpenstatistik (nach basics). Wir rechnen hier mit dem niedrigeren BFE-Niveau.

Die somit neu zugeordnete Absatzstatistik ergibt folgendes Bild:

Figur 11: **Wärmepumpenabsatz Anlagen < 20 kW, bereinigte Zuordnung**



Quelle: Prognos AG

Gemäss der Feldauswertung liegen die Jahresarbeitszahlen der Anlagen im Bestand zwischen 2.5 und 3.5, die Leistungsziffern zwischen etwa 3 und 5.5.

2.2. Grundsätzliche Überlegungen zu den Szenarien

Im Bereich Neubau Ein- und Zweifamilienhäuser ist der Marktanteil in den vergangenen Jahren nahezu auf das erwartbare Maximum gestiegen. Die restlichen Neubauten in diesem Bereich werden vor allem mit Holz und Fernwärme beheizt. Das Szenario I setzt diesen Trend mit einer Sättigung in diesem Bereich fort, obgleich die Preisszenarien dies nicht zwingend notwendig erscheinen lassen.

In Szenario IV werden Neubauten im EZFH-Segment nur noch mit nichtfossilen Heizsystemen ausgestattet: ca. 65 % Wärmepumpen, der Rest teilt sich auf Fernwärme, Holz, und Solarthermie (z. T. auch in Kombinationen) auf.

Die energetischen Standards der Gebäude verbessern sich durchwegs im Zeitablauf, wobei die Verbesserung in Szenario I am geringsten und in Szenario IV am höchsten ist.

Grundsätzlich gehen wir von Verbesserungen der JAZ und des COP der Wärmepumpen aus; darüber hinaus unterstellen wir ein moderates Wachstum von Gross-Wärmepumpen, eine allmähliche Marktdurchdringung von Gas-Wärmepumpen sowie eine Entwicklung zur Marktreife von Absorptions-/Adsorptionswärmepumpen, die insbesondere auch zu sommerlichen Kühlungs Zwecken dienen können.

Ausserdem wird von einer breiteren Umsetzung auch in den Sektoren Industrie (hier vor allem Abwärmenutzung) und Dienstleistungen ausgegangen.

Die Jahresarbeitszahlen von Neuzugängen bei Wärmepumpen steigen bis auf ca. 4.0 in Szenario I und 4.7 in Szenario IV in 2035.

Da die den Szenarien zugrunde liegenden Preisszenarien unter dem derzeit aktuellen Ölpreispeak liegen, wird angenommen, dass sich die Neuabsatzzahlen von Wärmepumpen von 2004 / 2005 zunächst (insbesondere in Szenario I) nicht aufrechterhalten lassen, danach aber wieder anziehen.

Für den Bereich der Gebäudeheizungen sind Wärmepumpen vor allem ein System für den energieeffizienten Neubau. Im Bereich des Gebäudebestands sind sie eines von mehreren Zielen für die Substitution von Heizungssystemen und kommen vor allem dann zum Zuge, wenn Gebäude umfassend wärmetechnisch saniert werden, Niedertemperatur-Flächenheizsysteme eingebaut werden und genügend Quellen zur Verfügung stehen. Die Wärmedichte der Quellen ist insbesondere in Gebieten hoher Baudichte ein begrenzender Faktor, da das Erschliessen von Erdquellen mittels Bohrungen und Sonden durch die vorhandene Infrastruktur (Strassen, Leitungskanäle etc.) aufwendig und teuer macht. Die Durchdringung von Wärmepumpen im Bestand nimmt in den Szenarien III und IV zu, bleibt aufgrund der technischen Schwierigkeiten aber voraussichtlich begrenzt.

Bei der Ermittlung des ausschöpfbaren Potenzials für Wärmepumpen in den einzelnen Szenarien sind jeweils Anteile der Potenziale der Wärmequellen und der Wärmenachfrage zur Deckung zu bringen. Diese unterliegen jeweils unterschiedlichen Restriktionen und „Gesetzen“:

Quellen:

- Das theoretische Potenzial der Quellen (Luft, Erdreich, Abwasser, Oberflächen- und Fließgewässer) ist unbekannt, aber vermutlich hoch genug, um keine grundsätzliche Restriktion darzustellen.
- Die ökologische Anforderung der Aufrechterhaltung der Regenerationsfähigkeit begrenzt die dauerhaft zu entnehmende Leistungsdichte. Anforderungen an die Grundwasserqualitäten schliessen bestimmte Bereiche und theoretische Quellen ganz aus.
- Die Leistungsdichten der Quellen müssen (technisch und räumlich/regional) mit den Leistungsdichten der Wärmeabnehmer korrespondieren. Diese Restriktion ist teils technisch, teils wirtschaftlich.

Wärmenachfrage:

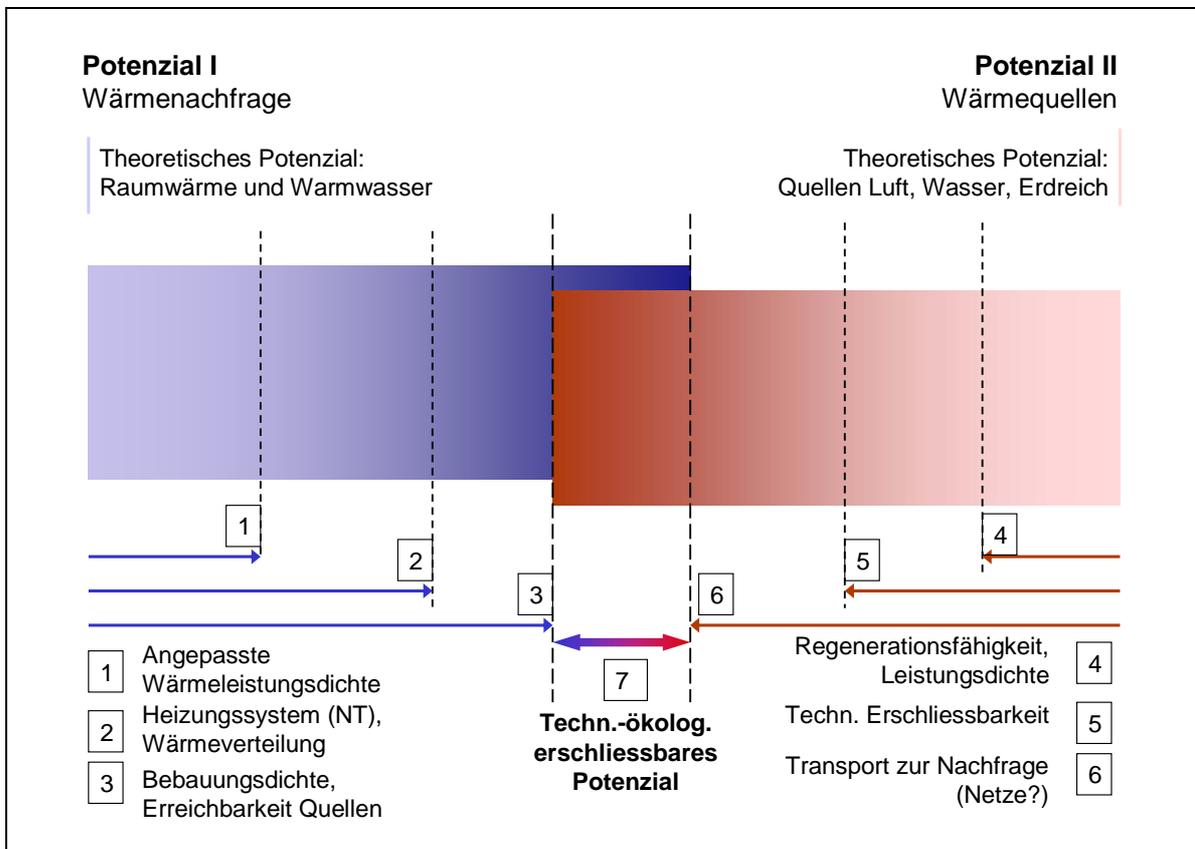
- Das theoretische Potenzial auf der Nachfrageseite ist der Raumwärme- und Warmwasserbedarf in den jeweiligen Szenarien.
- Damit Wärmepumpen sinnvoll eingesetzt werden können und die Erschliessung der Quellen mit vernünftigem Aufwand erreicht werden kann (Durchströmungsraten bei Luft, Dichte und Tiefe bei Erdsonden etc.), sind energetisch hochwertige Gebäude mit geringen Leistungsdichten, sowohl bei einzelnen Objekten als auch bei WP-beheizten Gebieten, erforderlich. Hier kommen hauptsächlich Neubauten auf guten Wärmeschutzstandards sowie grundsanierte Bestandsgebäude in Betracht.
- Die Wärmeverteilung im Gebäude sollte zur Erzielung grosser Leistungsziffern nach Möglichkeit mit Niedertemperatur-Flächenheizsystemen erfolgen. Im Gebäudebestand bedeutet dies oftmals, dass neben einer wärmetechnischen Grundsanierung an der Gebäudehülle auch ein Umbau des Wärmeverteilungssystems erfolgen muss.
- Erreichbarkeit und Erschliessbarkeit der Quellen: Der technische Aufwand, die Quellen mit hinreichender Leistungsdichte zu erschliessen, muss geleistet werden können: Luftdurchsätze, Erdsonden (Anzahl, Dichte, vorhandene Infrastruktur im Boden), Wärme- oder Wassertransport bei Oberflächengewässern etc. Auch diese Fragestellung ist eine technisch-ökonomische.

Die Grundsätze dieser Potenzialermittlung sind in Figur 12 schematisch dargestellt.

Die Erschliessung der Quellen ist im Grundsatz keiner zeitlichen Restriktion unterworfen. Die Umsetzung von Wärmepumpenanlagen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser ist in der Ausschöpfung zeitlich an die jeweiligen Arbeiten in den Gebäuden gebunden. Im Neubausektor folgt die Ausschöpfung dem nahezu linearen Wachstum der Neubauf Flächen (mit hohem Prozentsatz bei den Ein- und Zweifamilienhäusern sowie den vergleichbaren kleinen Dienstleistungsobjekten, mit einem geringeren, aber steigenden Prozentsatz bei den Mehrfamilienhäusern und den grossen Industrie- und Dienstleistungsobjekten). Im Gebäudebestand hängt die Umsetzung von den Sanierungsraten der wärmetechnischen Standards sowie den Erneuerungszyklen der Heizungsanlagen samt Wärmeverteilung ab. Die Anteile der Wärmepumpen hieran werden in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich (steigend) angenommen. Es muss davon ausgegangen werden, dass ein „verpasster Zeitpunkt“ der Investition das entsprechende Objekt für ca. 20 Jahre dem Potenzial entzieht.

Die schematische Dynamik der zeitlichen Ausschöpfung der erschliessbaren Potenziale (die in den einzelnen Szenarien je nach unterstellter Politikstrategie unterschiedlich hoch sind) ist in Figur 13 in normierten Einheiten dargestellt.

Figur 12: Grundsätze der Potenzialermittlung für den Wärmepumpeneinsatz in den Szenarien, schematische Darstellung

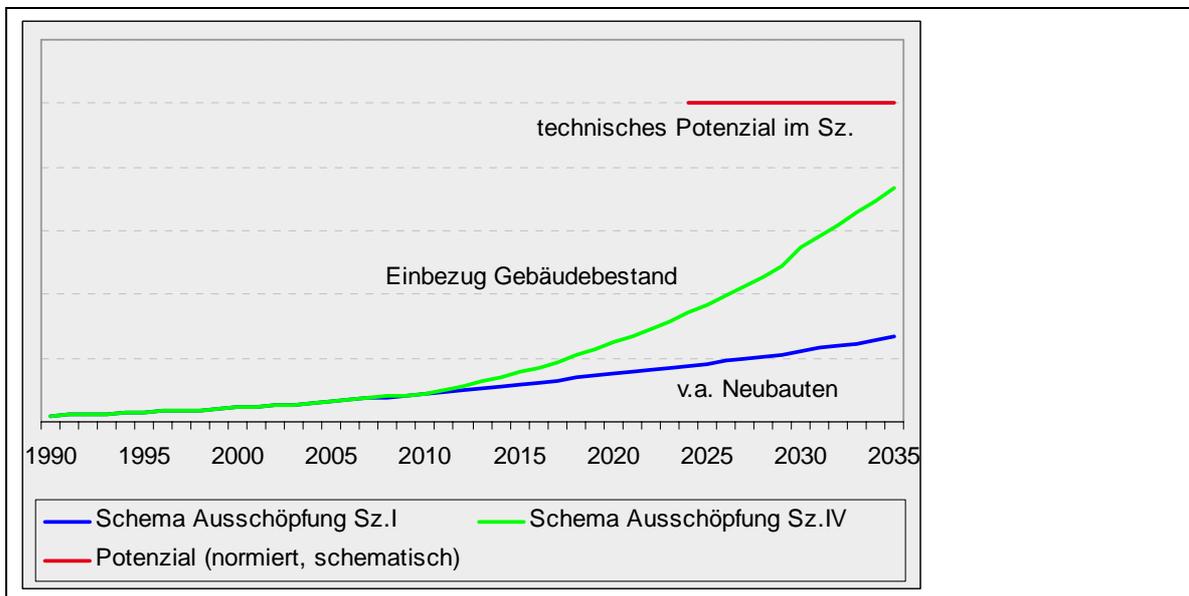


Prognos 2006

2.3. Szenarienergebnisse im Bereich Wohnungen

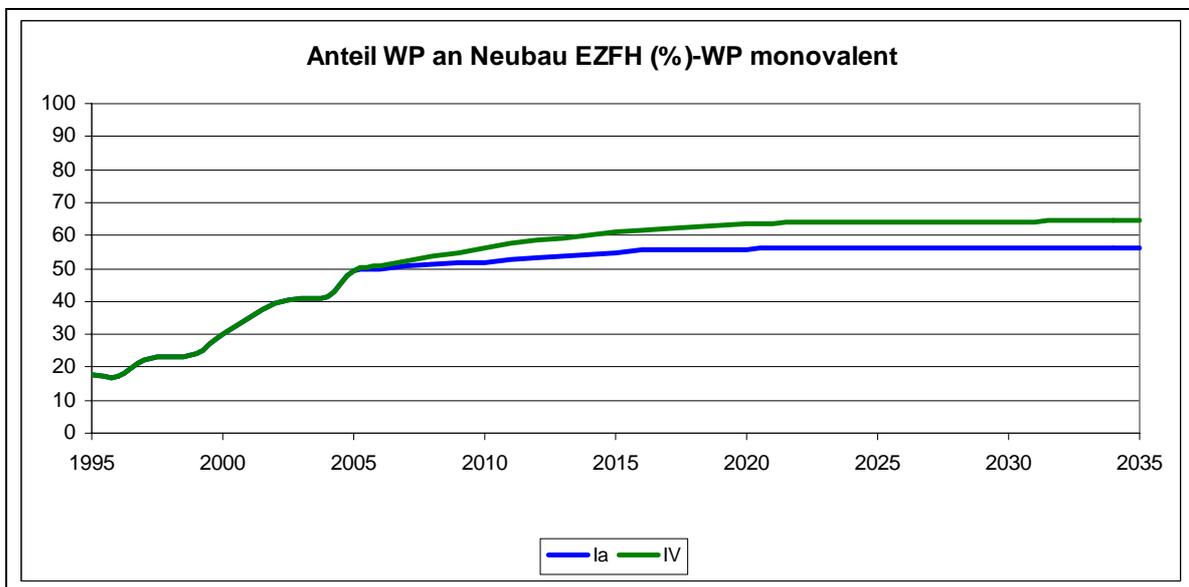
Szenario I schreibt i.w. die Absatzstatistik mit den Neuzugängen fort; im Bereich der neu gebauten Ein- und Zweifamilienhäuser wird sich nahezu eine Sättigung ergeben. In den anderen Bereichen, insbesondere bei der Substitution anderer Heizungsanlagen bei sanierten Gebäuden, ist ein deutliches Wachstum der Anteile zu verzeichnen.

Figur 13: zeitliche Entwicklung der Ausschöpfung der szenarienabhängigen erschliessbaren Potenziale, in normierten Einheiten



Prognos 2006

Figur 14: Anteil von Wärmepumpen an der Beheizung von EZFH-Neubauten

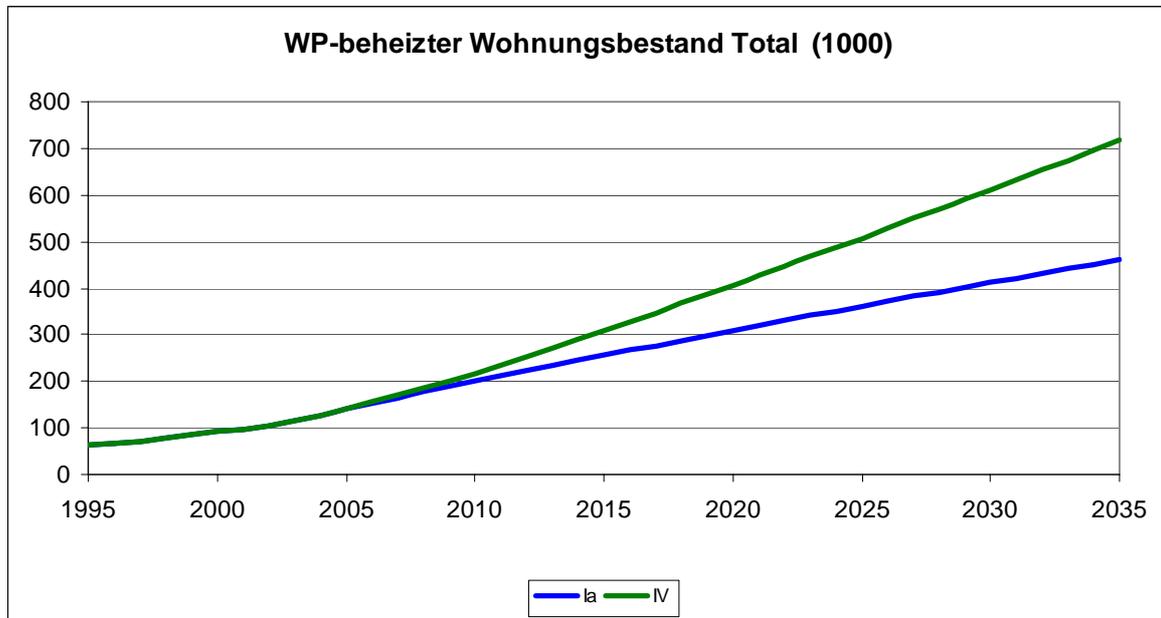


Prognos 2006

In Szenario IV werden die infrastrukturellen Möglichkeiten (auch unkonventionelle Quellen werden genutzt, auch unwirtschaftliche Lösungen in MFH kommen vor) sehr weit ausgeschöpft. Allerdings wird davon ausgegangen, dass keine neuen grossen Wärmenetze in bereits bestehenden Gebieten gebaut werden. Dies begrenzt die Erschliessung potenziell attraktiver grösserer, aber entfernter Quellen, wie z.B. Seen.

In der folgenden Figur werden die integrierten WP-beheizten Wohnungsbestände (über alle Gebäudegrößen und Altersklassen summiert) für Szenario I und IV verdeutlicht.

Figur 15: **WP-beheizter Wohnungsbestand in den Szenarien I und IV**

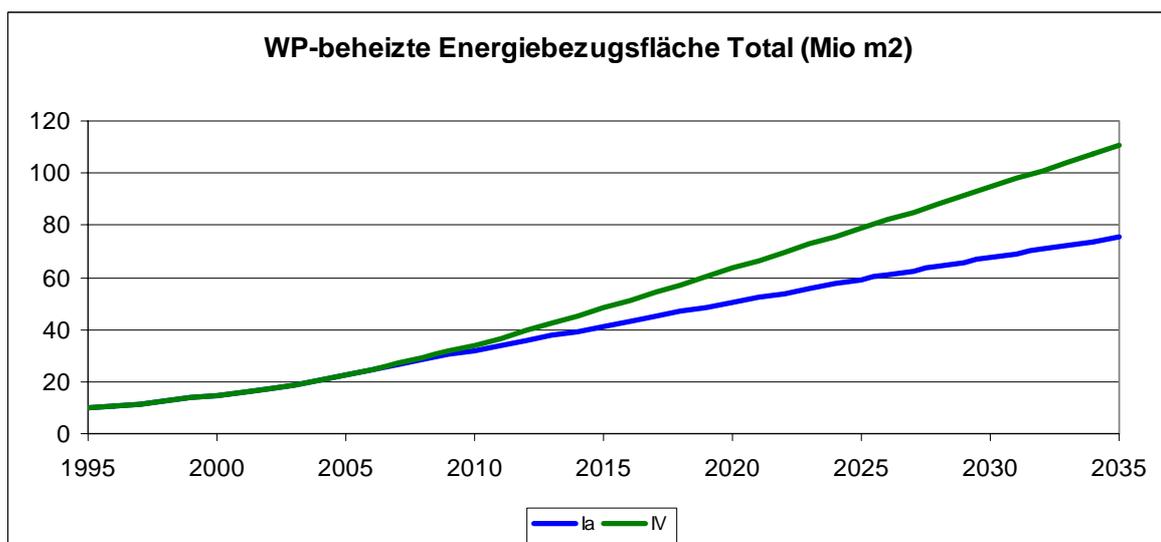


Prognos 2006

In Szenario I steigt die Zahl der WP-beheizten Wohnungen zwischen 2000 und 2035 um 460 %, in Szenario IV um 750 %.

Bezogen auf die Energiebezugsflächen ergibt sich ein ähnliches Bild.

Figur 16: **WP-beheizte Energiebezugsflächen im Sektor Private Haushalte in den Szenarien I und IV**

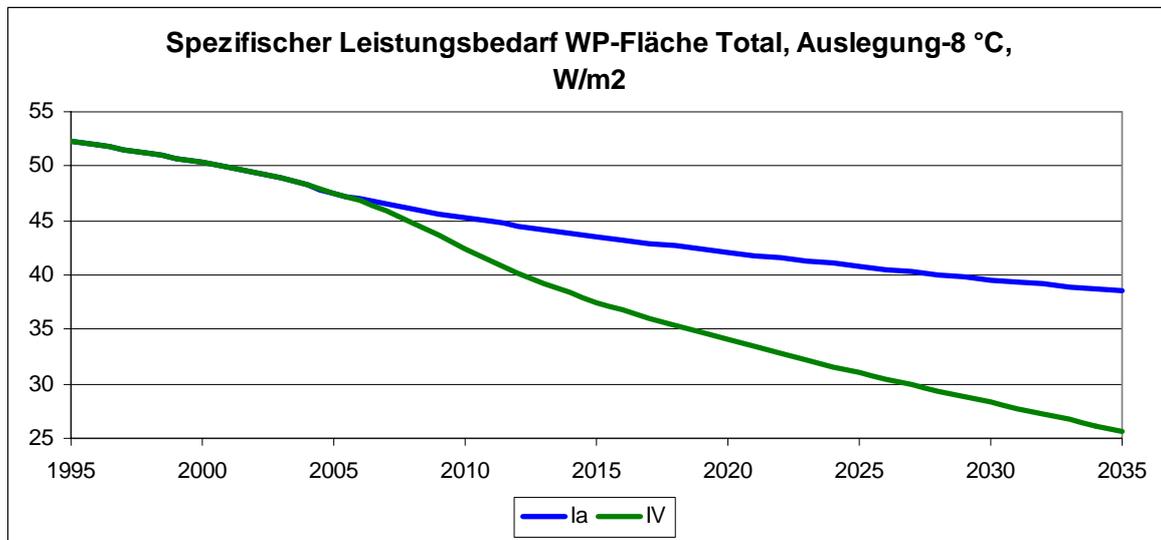


Prognos 2006

Steigerung Sz I 2035 / 2000: 433 %
Steigerung Sz IV 2035 / 2000: 610 %

Wie bereits mehrfach angesprochen, sind Wärmepumpen besonders günstige Heizsysteme für Gebäude mit geringem spezifischem Energie- und Heizleistungsbedarf. In diesen werden die WP auch in den Szenarien bevorzugt eingesetzt. Da Szenario IV einen starken Effizienzfokus hat, verringern sich die spezifischen Heizwärmeleistungsbedarfe gegenüber Szenario I deutlich.

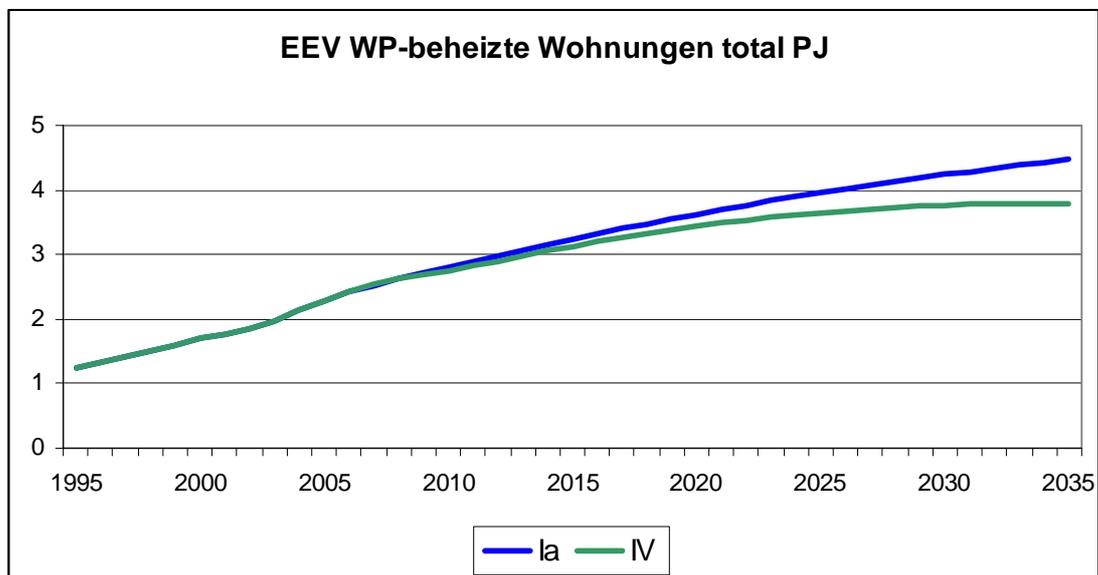
Figur 17: **spezifischer Heizwärmeleistungsbedarf der von Wärmepumpen beheizten Wohnungsflächen (Durchschnitt) im Auslegungsfall in den Szenarien I und IV**



Prognos 2006

In Figur 17 ist die Szenarienvoraussetzung illustriert, dass in Szenario IV alle Effizienzpotenziale auf der Nachfrageseite massiv erhöht und ausgeschöpft werden. Durch diese Entwicklung verringert sich insbesondere der für den WP-Einsatz notwendige Bedarf an Quellen-Flächen (Erdkollektoren) und –Volumina oder Volumenströmen und Sondenlängen. Dies wiederum ist eine wichtige infrastrukturelle Voraussetzung für den breiten Einsatz von Wärmepumpen in grösseren und verdichteten Objekten.

Figur 18: **Endenergieverbrauch aller WP-beheizten Wohnungen in PJ in den Szenarien I und IV**

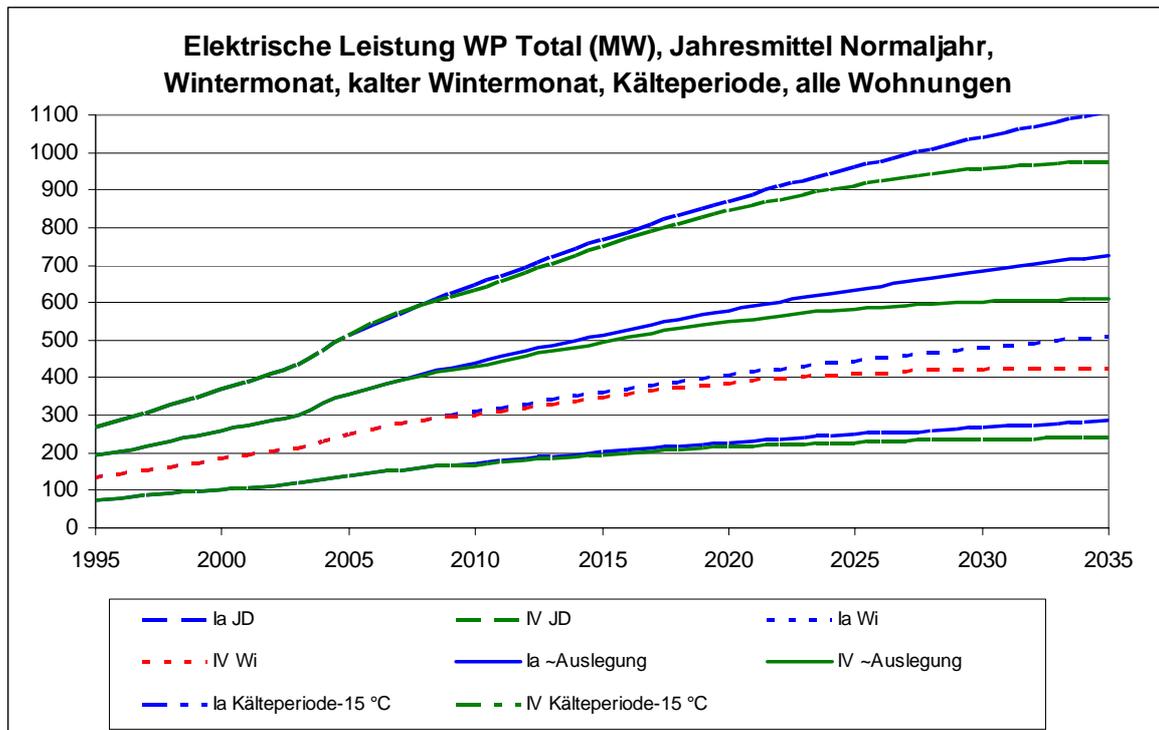


Prognos 2006

Aufgrund der konsequenten Reduktion des Heizleistungsbedarfs auf der Nachfrageseite nimmt trotz der erheblichen Erhöhung des Anteils der Wärmepumpen gegenüber Szenario I die durch Wärmepumpen gedeckte Endenergienachfrage ab (Figur 18).

2.4. Auswirkungen auf den Leistungsbedarf bei den WP-beheizten Wohnungen

Figur 19: Elektrische Leistung aller im Wohnungsbereich eingesetzten Wärmepumpen im Jahresmittel im Normjahr, in einem normalen Wintermonat, in einem kalten Wintermonat (Auslegungsfall) sowie in einer Kälteperiode in den Szenarien I und IV



Prognos 2006

Bei der Darstellung in dieser Figur zeigt sich deutlich, dass bei der Betrachtung und Beurteilung von Wärmepumpen insbesondere die Leistungsseite in der Extremsituation zu berücksichtigen ist. Die allein im Wohnungsbereich benötigte Spitzenleistung von knapp 1'000 MW in Szenario IV (knapp 2 moderne GuD-Blöcke) darf bei der Frage des Strombedarfs für die Wärmepumpen nicht ausser Acht gelassen werden. Interessant ist auch hier wieder, dass in Szenario I aufgrund der weniger hohen Gebäudestandards, trotz eines deutlich geringeren Anteils an WP, der Leistungsbedarf sowohl im Normal- als auch im Spitzenlastfall um mehr als 10 % über dem von Szenario IV liegt. Eine elektrische WP-Strategie empfiehlt sich also nur in Kombination mit einer verstärkten Wärmeschutz-Strategie.

2.5. Entwicklung der Wärmepumpe in allen Sektoren

In allen Sektoren sowie in der Fernwärmeerzeugung werden in den Szenarien Wärmepumpen eingesetzt. Hierbei wird von den folgenden Prämissen ausgegangen:

Im Bereich kleiner Neubauten im **Industrie- und Dienstleistungssektor** greifen die gleichen Mechanismen wie im Wohnungssektor – die WP hat einen hohen Anteil an der Beheizungsstruktur. Im Bereich des Gebäudebestands ist die Durchdringung aufgrund technischer Restriktionen (Verfügbarkeit von Quellen hinreichender Leistungsdichte und Leistung, angepasstes Heizungssystem) geringer, wird aber in den Zielszenarien (III und IV) deutlich stärker ausgeschöpft. Im Dienstleistungssektor können in grossen Gebäuden, die sowohl über Heizungs- als auch Kühlungsbedarf verfügen, verstärkt Absorptionswärmepumpen eingesetzt werden.

Im **Industriesektor** werden die Möglichkeiten der Abwärmenutzung – direkt und mit Hilfe von Wärmepumpen – stark ausgeschöpft. Die dabei als Quelle verwendete Prozess-Abwärme wird hier zu Demonstrationszwecken ausgewiesen. In der Energiebilanz taucht sie nicht auf, da es sich bei diesen Prozessen streng genommen um eine Effizienz- und nicht um eine Regenerativmassnahme handelt: Die Abwärme wurde als Prozessenergie bereits durch eine andere Quelle, die in der Bilanz verbucht ist, erzeugt.

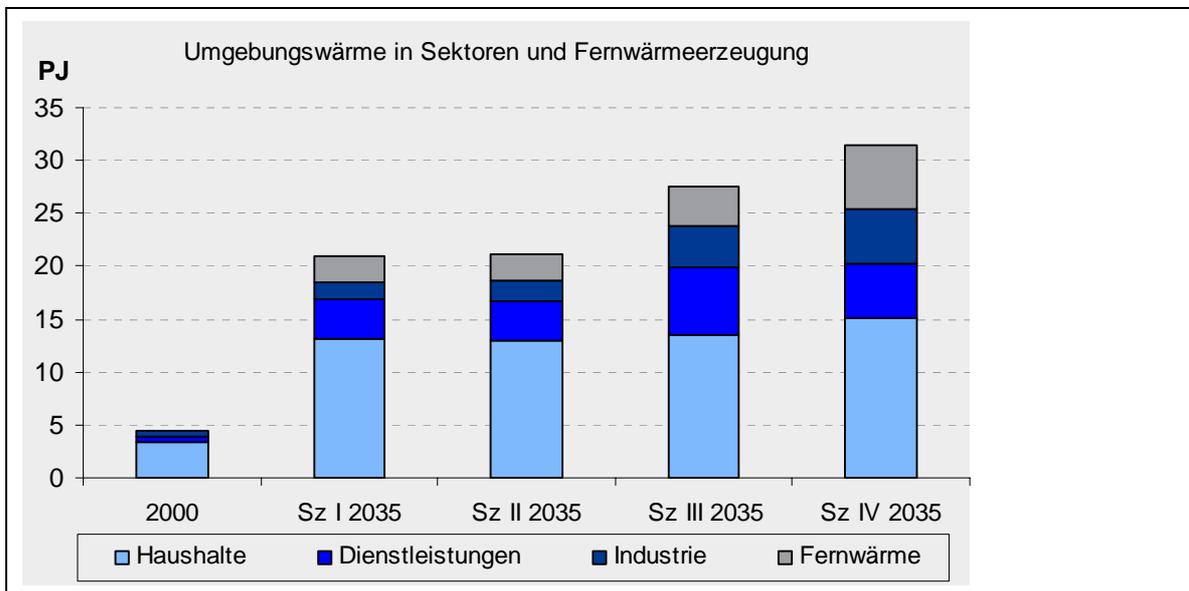
In den Szenarien steigt die Fernwärmenachfrage moderat an. Hinter diesem Anstieg steht die Überlegung, dass auch künftig, insbesondere in verdichteten oder leicht durchmischten Neubaugebieten, auch Nahwärmesysteme gebaut werden. Grosse neue Fernwärmesysteme werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht unterstellt, ebenso wenig Fernwärmeverdichtung in bereits dicht bebauten urbanen Gebieten. Die bestehenden urbanen Fernwärmenetze werden weiter betrieben.

In der **Fernwärme** sind in den einzelnen Szenarien unterschiedliche Anteile von Wärmepumpen-Wärme enthalten. In der Fernwärmeerzeugung gibt es als „Konstanten“ die Fernwärmeerzeugung aus den KVAs sowie die Auskopplung aus einem KKW, die über die Laufzeit der Perspektiven als unverändert unterstellt wird (Leibstadt bleibt über 2035 hinaus am Netz). Die KVA-Fernwärme nimmt im Lauf der Zeit ab (ca. 20%), wenn die Anlagen in Richtung höherer Stromwirkungsgrade optimiert werden, was im Kraftwerkspark vorgesehen ist. Darüber hinaus gehen wir davon aus, dass auch ein gewisser Anteil an Holz(pellets-)feuerungsanlagen für die Erzeugung von Fern- und Nahwärme eingesetzt wird; dies gilt insbesondere für neue Nahwärmenetze. Wärmepumpen für die Fernwärme sind vor allem im grösseren Leistungsbereich anzusiedeln und ggf. an den grösseren Wärmequellen (wie z.B. Seen) mit Netzzugang zu denken. Die Kapazitäten der Netze (abgebildet im moderaten Nachfragewachstum) bilden hier ggf. einen begrenzenden Faktor.

In Szenario IV werden die derzeit noch in der Fernwärmeerzeugung eingesetzten Mengen an Erdgas nahezu vollständig durch erneuerbare Energien ersetzt. Einzige Ausnahme bleibt Gas als Brennstoff für gasbetriebene Gross-Wärmepumpen. Insgesamt wird ein moderates Wachstum der durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen unterstellt; dieses ist jedoch aus den in Kap. 2 bereits genannten Gründen (mehr standardisierte Serienfertigung, weniger Optimierung auf energetische Qualität) moderat (Verteilung der JAZ zwischen 3.5 und 4.5)

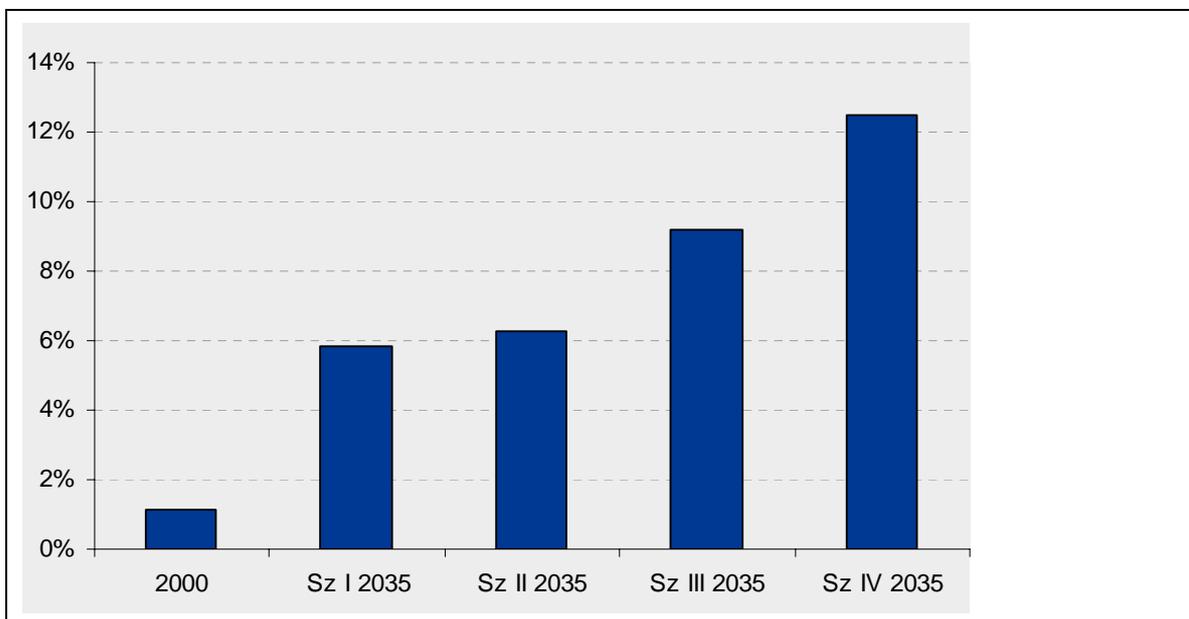
Die folgenden Figuren zeigen die Ergebnisse (Umgebungswärme) nach Sektoren und Szenarien in 2035 im Vergleich zu 1990 und 2000.

Figur 20: **Umgebungswärme nach Sektoren und Szenarien in 2035 im Vergleich zu 2000, in PJ**



Prognos 2006

Figur 21: **Anteil der Umgebungswärme an der Wärmenachfrage in den Szenarien I-IV in 2035, Vergleich mit 1990 und 2000**

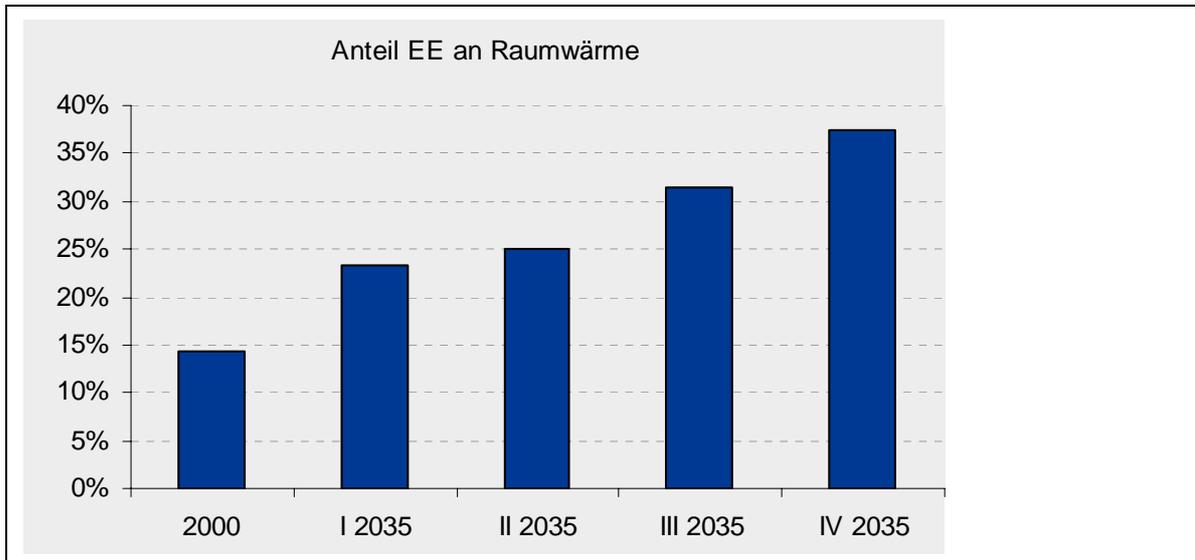


Prognos 2006

Figur 21 illustriert die gegenläufigen Effekte der Effizienzsteigerung und der Anteilssteigerung am Wärmebedarf: Verglichen mit dem Jahr 2000 verzehnfacht sich der Anteil Umgebungswärme am Wärmebedarf (und damit auch ungefähr die Zahl der Anlagen) in Szenario IV; gegenüber Szenario I lässt sich mehr als eine Verdoppelung des Anteils verzeichnen.

Zur Einordnung der Ergebnisse wird in Figur 21a der Anteil der erneuerbaren Energien (incl. der erneuerbaren Energien in der Fernwärme) an der Raumwärme (ohne industrielle Prozesswärme) dargestellt.

Figur 21a: **Anteil der erneuerbaren Energien an der Raumwärme in 2000 sowie in den Szenarien I bis IV in 2035**



Quelle: Prognos 2006

Die für den Betrieb der Wärmepumpen einzusetzende elektrische Arbeit ergibt sich in Szenario I in 2035 zu etwa 5.2 PJ, in Szenario IV zu etwa 7.8 PJ. Die elektrische Leistung im Auslegungsfall (-8 °C) beträgt in Szenario I insgesamt ca. 1.1 GW, in Szenario IV ca. 1.6 GW; die in der Winterspitze (-10 - -15 °C) benötigte Leistung beträgt in Szenario I ca. 1.3 GW, in Szenario VI ca. 2.0 GW.

Tab. 2: **Bedarf an elektrischer Arbeit, Auslegungsleistung und Winterspitzenleistung**

	2000	Sz I 2035	Sz II 2035	Sz III 2035	Sz IV 2035
el. Strom PJ	1.5	5.2	5.2	6.8	7.8
Auslegungsleistung GW	0.3	1.0	1.0	1.3	1.5
Winterspitze GW	0.4	1.3	1.4	1.8	2.0

Prognos 2006

Grundsätzlich erscheint es unwahrscheinlich, dass bei solch kumulierten hohen Leistungsnachfragen, die hauptsächlich in der Winter-Grundlast auftreten, dauerhaft mit günstigen Wärmepumpen-Tarifen gerechnet werden kann.

Zur Unterstützung der Konkurrenzfähigkeit der elektrischen Wärmepumpen insbesondere beim Ersatz von elektrischen Widerstandsheizungen oder von Ölheizungen in bestehenden Gebäuden, sind Investitionsbeiträge (insbesondere im Zusammenhang mit Gesamtanierungen), eine differenzierte Ausgestaltung der Elektrizitätstarife oder der in Szenario III und IV auf Elektrizität erhobenen Lenkungsabgabe denkbar. Ferner ist bei grossen Anlagen, z.B. bei Wärmepumpen, die Abwärme aus ARAs nutzen, allenfalls ein Anschlusszwang an das Wärmeverteilnetz notwendig.

3. Elektrische Widerstandsheizungen

Im Zusammenhang mit dem Elektrizitätsbedarf für Wärmepumpen wird häufig vorgebracht, dieser Elektrizitätsbedarf könne durch den Austausch von Elektrodirektheizungen durch andere Systeme kompensiert werden. Es lohnt, hier die Grundlagen genauer zu betrachten.

Elektrische Widerstandsheizungen werden häufig in Zweit- und Ferienwohnungen sowie in Einfamilienhäusern eingesetzt, in denen sie insbesondere aufgrund der geringen Nutzungsintensität den Vorteil haben, keine Infrastruktur für die Wärmeverteilung zu benötigen. In diesen Fällen erscheint eine Substitution zu einem (zentralen oder dezentralen) Heizsystem mit Verteilinfrastruktur (Warmwasser, Verrohrung) technisch und ökonomisch sehr aufwendig.

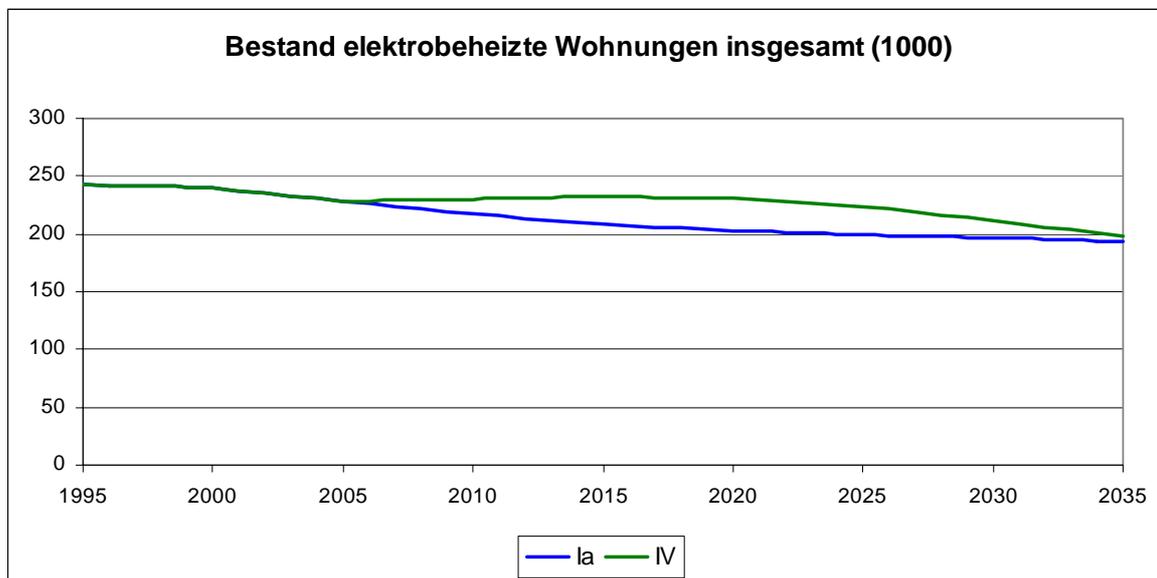
Im Falle von Mehrfamilienhäusern, in denen elektrisch beheizte zentrale (Warmwasser-) Systeme installiert sind, bestehen realistischere Substitutionsmöglichkeiten, da hier „nur“ der Wärmeerzeuger ausgetauscht werden muss.

Dennoch sind diese Anlagen oft wirtschaftlich günstig und insoweit substitutionsresistent.

Elektrische Widerstandsheizungen sind bei sporadischem und sehr tiefem spezifischem Wärmebedarf allenfalls energiewirtschaftlich gerechtfertigt. Speicherheizungen bieten den Elektrizitätslieferanten ferner die Möglichkeit der Lastverschiebung, insbesondere mit der Füllung von „Nachtälern“, soweit diese noch vorhanden sind und die entsprechende Elektrizitätsbeschaffung wettbewerbsfähig ist.

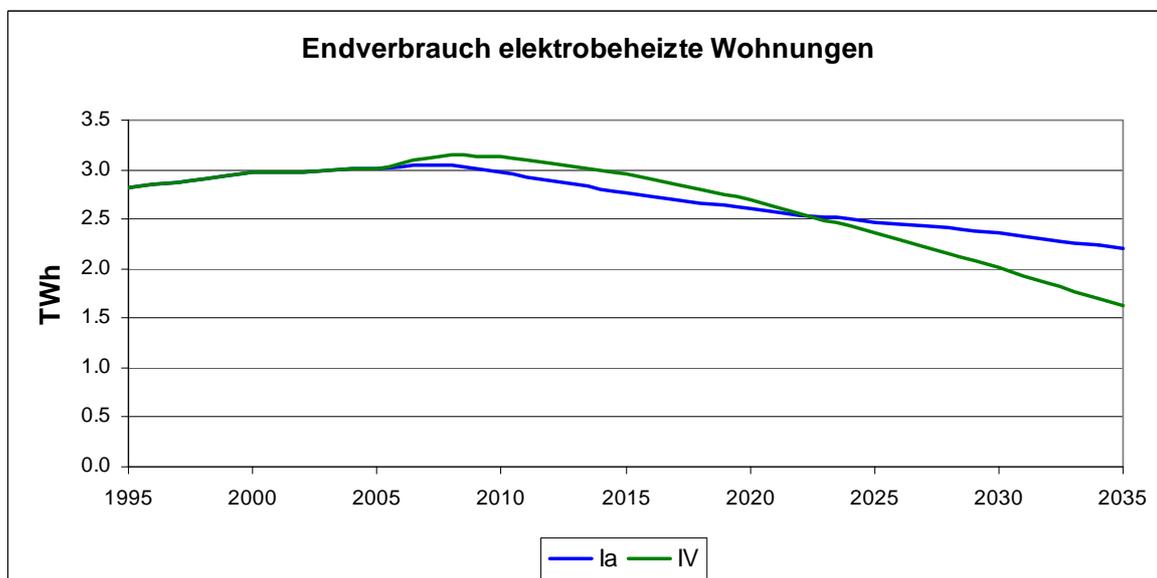
In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass aus wirtschaftlichen Gründen, oder auf Grund einer Bewilligungspflicht für Neuanschlüsse, vor allem in grösseren Wohngebäuden der Bestand an elektrischen Widerstandsheizungen zurückgeht. Im Bereich der Zweit- und Ferienwohnungen wird dagegen eine grössere Trägheit der Systeme unterstellt. Zu erwähnen ist, dass während der 90er Jahre bundesrechtlich festgelegt war, unter welchen Bedingungen die Installation neuer, ortsfester elektrischer Widerstandsheizungen zulässig ist (u. a. keine Erdgas- oder Fernwärmeanschlüsse, Wärmepumpen unverhältnismässig, Gründe der Denkmalpflege). Der Antrag eine Bewilligungspflicht im zu revidierenden Energiegesetz wieder einzuführen, ist am 5.10.06 im Ständerat abgelehnt worden.

Figur 22: Bestand elektrodirektbeheizter Wohnungen in den Szenarien I und IV, in 1000



Prognos 2006

Figur 23: Entwicklung des Jahresverbrauchs der elektrischen Widerstandsheizungen in Wohnungen in den Szenarien I und IV, in TWh



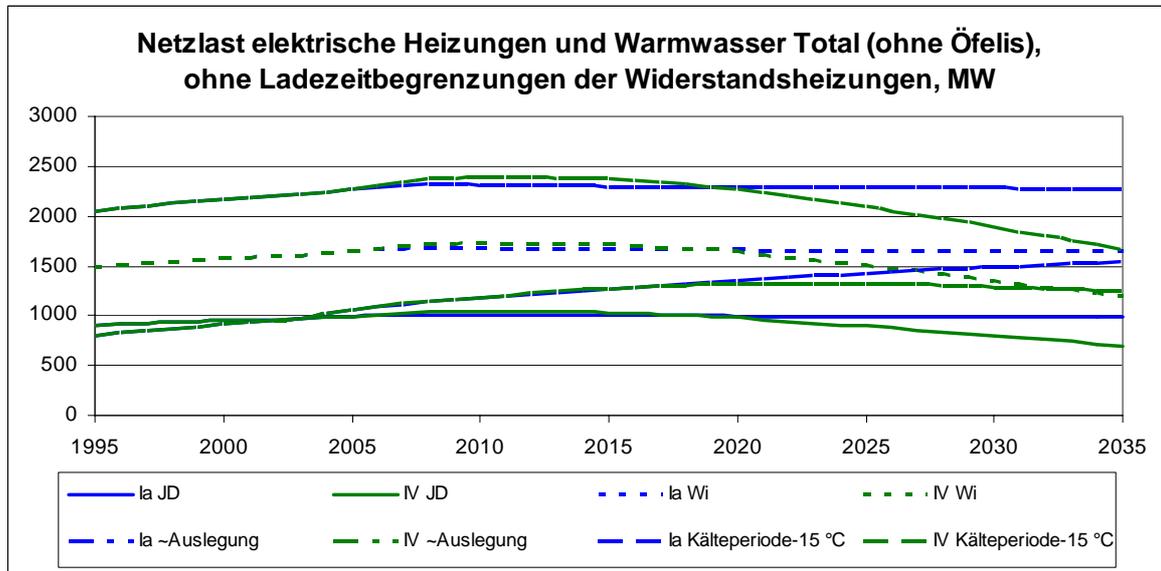
Prognos 2006

An Figur 23 ist wiederum deutlich zu sehen, dass sich die erhöhte Effizienz auf der Energiebedarfsseite in Szenario IV gegenüber Szenario I dämpfend auf den Verbrauch der elektrischen Widerstandsheizungen auswirkt, obgleich Anzahl und Fläche sich nicht stark unterscheiden.

In Figur 24 werden noch ähnlich wie bei den Wärmepumpenüberlegungen die kumulierte Netzlast im Jahresdurchschnitt, im Auslegungsfall und in der Winterspitze gezeigt (ohne

dass von einer Zusatzbeheizung durch mobile „Elektro-Öfelis“ ausgegangen wird. In Szenario IV ergibt sich somit immer noch eine Winterspitze von ca. 1 GW.

Figur 24: **Entwicklung des Leistungsbedarfs der elektrischen Widerstandsheizungen in Wohnungen in den Szenarien I und IV in MW**



Prognos 2006

Hierbei sind der Jahresdurchschnitt („JD“), der Auslegungsfall -8 °C Aussentemperatur („Auslegung“) sowie ein kalter Tag der „Winterspitze“ (ca -15 °C, „Wi“) berechnet und aufgetragen.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Energiesparhaus.at
www.energiesparhaus.at/energie/waermepumpe_funktion.htm
- [2] IBS INGENIEURBÜRO FÜR HAUSTECHNIK SCHREINER
http://energieberatung.ibs-hlk.de/planwp_typquell.htm
- [3] Vaillant GmbH
http://www.vaillant.de/Privatkunden/Zukunftsenergien/Entwicklung/Zeolith-Heizgeraet/article/Funktionsprinzip_des_Zeolith-Moduls.html
- [4] Ochsner Wärmepumpen GmbH
- [5] BFE (2004), Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003
- [6] BFE (2005), Qualitäts-Prüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen
- [7] Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS
FWS Merkblatt 2
- [8] www.waermepumpen-ratgeber.de
- [9] Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2003) Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland
- [10] EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Heizen und Kühlen mit Abwasser
- [11] Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen Hannover, Entwicklung einer CO₂-Wärmepumpe für Altbau-Heizungsanlagen
- [12] awtec AG für Technologie und Innovation/ Stiebel Eltron GmbH & Co. KG,, „Wärmepumpen mit CO₂ als Kältemittel – Stand der Technik“ (Schlussbericht Oktober 2005), vom BFE gefördertes Projekt
- [13] Prognos AG, P. Hofer, Energieperspektiven Schweiz 2035, Der Energieverbrauch der privaten Haushalte, Schlussbericht, Basel 2006 (to be published,)
- [14] basics AG, W. Baumgartner, Energieperspektiven Schweiz 2035, Modellierung des Energieverbrauchs in der Industrie, Schlussbericht, Zürich 2006 (to be published)
- [15] CEPE, B. Aebischer, Energieperspektiven Schweiz 2035, Modellierung des Energieverbrauchs im Sektor Gewerbe, Handel Dienstleistungen, Schlussbericht, Zürich 2006 (to be published)
- [16] BFE, Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung, Schlussbericht, 2005