Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 91 (2000)

Heft: 12

Artikel: Perspektiven der zukünftigen Strom- und Wärmeversorgung für die Schweiz

Autor: Gantner, Urs / Jakob, Martin / Hirschberg, Stefan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855561

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Perspektiven der zukünftigen Strom- und Wärmeversorgung für die Schweiz

Umweltneutral, kostengünstig, gewappnet gegen ökonomische Risiken, unabhängig vom Ausland sowie ohne Versorgungsengpässe und Risiko schwerer Unfälle – so sieht die ideale zukünftige Energieversorgung aus. Auch wenn zum Teil bemerkenswerte Verbesserungen für die einzelnen Versorgungssysteme zu erwarten sind, wird die nächste Generation der Energiebereitstellungsanlagen – und somit der zukünftige Anlagenpark – diese Punkte noch nicht kollektiv erfüllen können. Wie Untersuchungen des Paul Scherrer Instituts (PSI) in Zusammenarbeit mit dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) zeigen, liegt dies einerseits im mittelfristig nur beschränkt erschliessbaren Potenzial erneuerbarer Energiequellen und andererseits an den weiterhin hauptsächlich nicht erneuerbaren Energieträgern, die für die rationelle Energienutzung eingesetzt werden.

■ Urs Gantner, Martin Jakob und Stefan Hirschberg

Einleitung

Anthropogene Eingriffe in natürliche Abläufe und die damit verbundenen Veränderungen sind bei der Nutzung und Bereitstellung von Wärme und Elektrizität nicht vermeidbar. Neben dem bewussten Benutzerverhalten kann vor allem die geeignete Wahl der Energiequellen und -ketten dazu beitragen, eine in Bezug auf Ökologie und Ökonomie möglichst nachhaltige Energienutzung zu betreiben. Im Rahmen des Projekts ***Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (GaBE)*** untersucht das ***Paul Scherrer Institut (PSI)*** verschiedene zukünftige Energiesysteme zur Wärme- und Stromerzeugung [1]. Diese Aktivitäten stellen einen wesentlichen Teil von Untersuchungen der Elektrizitätswirtschaft dar, um die Möglichkeiten, Grenzen und Auswirkungen einer vermehrt dezentralen Energieproduktion mit Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK) abzuschätzen. Zusätzlich wurden Energieversorgungsvarianten mit einem starken Ausbau von Wärmepumpenanlagen (WP) berücksichtigt.

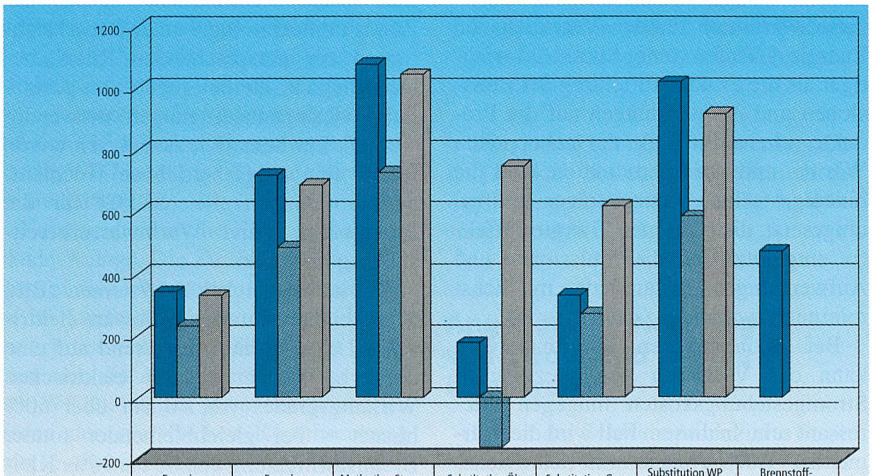
Die Arbeiten der Elektrizitätswirtschaft waren eine Weiterführung der Vorschau '95, die verschiedene Elektrizitätsversorgungsvarianten und ihre Auswirkungen auf der Basis von zentralen Kraftwerken untersuchte [2,3]. Das PSI trug zu diesen beiden Projekten als Forschungszusammenarbeit mit dem VSE bei.

Weitergehende Untersuchungen des GaBE-Projekts schliessen einen stärkeren Ausbau erneuerbarer Energien und Sparmassnahmen/Effizienztechniken mit ein [4,5,6]. Im Ausblick werden die Resultate dieser Energieversorgungsvarianten qualitativ vorgestellt.

Strom und Wärme gemeinsam betrachten

Werden WKK-Anlagen als Alternative in einer zukünftigen Stromversorgung zugelassen, müsste man – um faire Vergleiche zu gewährleisten – die Aufwendungen und Emissionen jeglicher Art sowie die Kosten auf die beiden Produkte (Strom und Wärme) aufteilten. Da diese Zuordnungen (Allokationen) zwischen Wärme und Strom immer willkürlich sein werden, wird in diesem Projekt der Betrachtungshorizont erweitert und eine zukünftige Energienachfrage definiert, die sowohl Strom als auch Wärme beinhaltet. Dadurch kann man auf Allokationen, die je nach Kriterium sehr grosse Unterschiede ergeben würden, gänzlich verzichten.

Bild 1 zeigt für eine in einer Wohnsiedlung eingesetzten heutigen WKK-Anlage ausgewählte Luftemissionen pro gelieferte Einheit Strom, berechnet nach verschiedenen Allokationsverfahren. Die



	Energie	Exergie	Motivation Strom	Substitution Öl	Substitution Gas	Substitution WP (CH)	Brennstoff-Mehrverbrauch
■ $t(CO_2\text{-äquiv.})/GWh_e$	342	721	1081	176	331	1021	475
■ $kg(NO_x)/GWh_e$	231	485	729	–161	272	585	
■ $kg(CO)/GWh_e$	330	688	1046	748	619	919	

Bild 1 Variation von ökologischen Resultaten bei Verwendung von verschiedenen Zuordnungskriterien für ausgewählte Emissionen einer kompletten Lebenszyklusanalyse einer heutigen WKK-Anlage.

Adresse der Autoren
Urs Gantner, Martin Jakob, Stefan Hirschberg
Paul Scherrer Institut
CH-5232 Villigen PSI

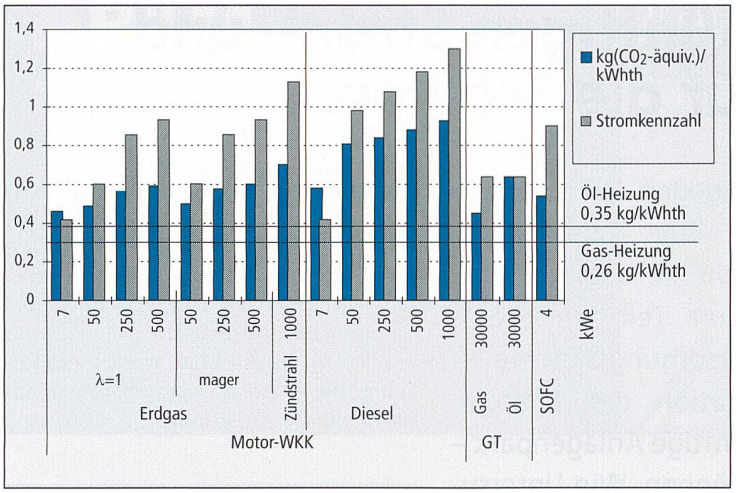


Bild 2 Übersicht von WKK-Systemen: Treibhausgas-Emissionen und produzierte Strommenge pro thermische Nutzenergie [1].

Kriterien *Energie* und *Exergie* teilen die totalen Emissionen der ganzen Ketten nach naturwissenschaftlichen Gegebenheiten auf. Liegt das Hauptinteresse am Produkt Strom, *Motivation Strom*, so müssen – falls die Wärme nicht genutzt wird – sämtliche Emissionen und Aufwendungen dem Strom zugeordnet werden. Eine weitere oft angewandte Möglichkeit ist das Erteilen von Gutschriften für die *Substitution* von Anlagen, die durch WKK ersetzt werden. Je nach der ökologischen Performance des zu substituierenden Systems fallen diese nur noch fiktiven Emissionen für die WKK-Anlage tiefer oder höher aus. Die Allokationsmethode *Mehrverbrauch* vergleicht die Nutzwärmebereitstellung mittels konventioneller Heizkessel mit der WKK-Anlage. Durch die tieferen thermischen Wirkungsgrade benötigt die WKK-Anlage mehr Brennstoff. Dieser Brennstoffmehrverbrauch wird der Stromproduktion angelastet.

Aus ökologischer Sicht machen Allokationsverfahren für den Vergleich von Energiesystemen wenig Sinn. Viel wichtiger als die exakte Aufteilung der Emissionen und Aufwendungen auf die Produkte scheint im Falle der gekoppelten Wärme- und Stromproduktion, dass die hineingesteckten Energieträger optimal umgesetzt, die erzeugten Energien effektiv eingesetzt und die Emissionen und Aufwendungen gesamthaft möglichst minimiert werden.

Bei ökonomischen Systemanalysen kann der Vergleich von spezifischen Stromgestehungskosten hingegen interessant sein. In diesem Fall wird die Wärme der WKK-Anlage mit den Grenzkosten der Wärmeerzeugung bewertet. Dies sind die Vollgestehungskosten einer konventionellen Heizungsanlage, denn der Fokus liegt bei den langfristigen Investitionsentscheiden. Bei der Betrachtung von kombinierten gesamtschweizerischen Strom- und Wärmevarianten genügt der Vergleich der Gesamtkosten der Varianten.

Parameter zukünftiger Energiesysteme

Für alle betrachteten Energiesysteme wird ein ***einheitlicher zukünftiger Stand der Technik*** angenommen (verfügbar im Zeitraum 2020 bis 2030). Der Analyse wurde ein breites Spektrum von 16 WKK-Anlagen zugrunde gelegt: Der Leistungsbereich erstreckt sich von kleinsten Anwendungen für den Einsatz in Einfamilienhäusern bis hin zu industriellen Anlagen im Bereich mehrerer MW_e, wobei sowohl Erdgas als auch Diesel bzw. Heizöl als Brennstoffe berücksichtigt wurden. Bei motorbetriebenen WKK-Anlagen unterscheidet man ausserdem zwischen der mageren und der stöchiometrischen Verbrennung sowie der Zündstrahltechnologie unter Berücksichtigung der entsprechenden Rückhaltetechnologien, die bei gegebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen notwendig werden. Für Sensitivitätsanalysen wurde ferner eine erdgasbetriebene Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung bilanziert.

Bei modernen WKK-Systemen (Bild 2) ab einigen hundert Kilowatt elektrischer Leistung läuft der Trend auf eine deutliche Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von 40 auf über 50% hinaus – bei gleichbleibender totaler Brennstoffnutzung von 80 bis 90%. Kleine motorbetriebene Systeme, so genannte Mini-BHKW, werden mit 25% bei einer relativ tiefen elektrischen Ausnutzung bleiben. Die grosse Innovation liegt bei diesen Systemen in einem neuartigen Regelsystem, das ohne den sonst üblichen Spitzenlastkessel (Deckung des Wärmebedarfs für wenige Stunden im Jahr) auskommt. Die SOFC kombiniert gleich mehrere Vorteile. Trotz kleiner Leistung werden elektrische Wirkungsgrade von über 50% und eine totale Brennstoffnutzung von gegen 100% erwartet. Zudem bilden sich durch die katalytische Nutzung des Brennstoffs in der Zelle nur Spuren der bei der konventionellen Verbrennung entstehenden Luftschadstoffe wie NO_x, CO, NMVOC und Partikel. Die tiefen Geräuschimmissionen und das exzellente Teillastverhalten sind weitere Pluspunkte des in der Testphase befindlichen Systems.

Neben den WKK-Anlagen werden für die reine Wärmeversorgung moderne fossile Heizkessel mit Jahresnutzungsgraden von 92 bis 102% sowie Wärmepumpen mit unterschiedlichen Wärmequellen und maximalen Jahresarbeitszahlen von 4,2 (Luft), 5 (Sole), 5,5 (Wasser) bzw. 6 (Abwärme) gedeckt. Moderne Gas- und Dampfkraftwerke (Kombi-KW) mit elektrischen Wirkungsgraden von 60% und fortgeschrittene Leichtwasserreaktoren werden in den Varianten für die zentralen Stromversorgungssysteme vorgesehen.

Für die ***ökologischen Vergleiche*** werden die ganzen Energieketten mit der Lebenszyklusanalyse (LCA) untersucht, deren Spektrum sich von der Rohstoffförderung über die Aufbereitung und den Transport bis zur Verwendung im Kraftwerk und zur Abfallbehandlung erstreckt. In einer LCA soll eine möglichst genaue Beschreibung der Flüsse von Stoffen jeder Art und deren Weg in die Umwelt vorgenommen werden können. Deshalb werden nicht nur der Betrieb der Anlage selber, sondern auch die Emissionen, die durch die Bau- und Abbruchphase entstehen, erfasst. Zudem werden die direkten und indirekten Emissionen der Energieketten in die Berechnungen mit einbezogen. Als direkte Emissionen werden jene bezeichnet, welche beim Betrieb von Kraftwerken und Anlagen zur Bereitstellung des Brennstoffs sowie durch den Betrieb von Abbaumaschinen und Transportsystemen entstehen. Indirekte Emissionen sind hauptsächlich eine Folge der Herstellung der Baumaterialien und des Energieverbrauchs für die Bereitstellung der gesamten Infrastruktur sowie verschiedene industrielle Prozesse.

Der angenommene Rahmen der ***wirtschaftlich-technischen Analyse*** ist ein reifer liberalisierter Markt ohne die heutigen Überkapazitäten. Betrachtet werden deshalb die Vollkosten von neuen Anlagen. Die Schwerpunkte der Analyse

bilden auf Anlagenebene der Einfluss der Gebäuderandbedingungen auf die Kosten sowie die zu erwartende zeitliche Kostenentwicklung:

Ausser der Investition für das WKK-Modul fallen weitere Kosten für die notwendige Peripherie und die gesamte Installation an. Diese liegen in etwa in der gleichen Grössenordnung wie die Modulkosten. Speziell untersucht wurde der Einfluss von Gebäudeparametern wie Sanierungszustand, Gebäudealter und vorhandener Platz auf die Realisierbarkeit und die Kosten der WKK-Anlagen. Dazu werden die Gebäudekategorien zusätzlich in drei bezüglich WKK-Investitionskosten homogene Gruppen, so genannte Kostenstufen, unterteilt. Ein Teil der Gebäude kann mit diesen Kostenstufen nicht erfasst werden, weil eine WKK-Anlage wirtschaftlich/technisch nicht realisierbar wäre (bei vollsanierten Gebäuden sind dies 20% bis 25%, bei den unsanierten 25% bis 30%). Werden die Gebäude aufsteigend nach WKK-Investitionskosten geordnet, umfasst die Kostenstufe I 25% der unsanierten bzw. 30% der sanierten Gebäude und die Stufe II weitere 30% (Tabelle I). Der restliche mit dieser Systematik erfassbare Teil der Gebäude fällt in die Stufe III. Den Resultaten liegt die Auswertung einer WKK-Firma mit einem Background von einigen Hundert realisierten bzw. offerierten Anlagen ab etwa 70 kW_e zugrunde [7].

Die unsanierten Gebäude folgen dem selben Muster. Im ersten Moment etwas unerwartet, liegt das absolute Niveau der Kosten bei gleicher Gebäudegrösse um 10 bis 15% tiefer. Begründet werden kann dies durch den Wärmebedarf, der grössere und damit spezifisch günstigere Anlagen ermöglicht.

Bei der zeitlichen Kostenentwicklung sind die technischen Verbesserungen zu vermerken. Es wird eine Leistungsverdichtung erwartet, was sowohl die Modulkosten wie auch die Betriebs- und Unterhaltskosten senken wird, denn ein wesentlicher Kostenpunkt beim Unterhalt ist der Ersatz des Motors nach rund fünf Betriebsjahren. Der Effekt ist bei kleinen Anlagen grösser. Aufgrund des Drucks

Gebäudegrösse EBF (m^2)	kW_e (ca.)	Invest.-Kosten ($kFr./kW_e$) neue	sanierte Gebäude Kst. I	Kst. II	Kst. III
8500	95	2,5	2,5	3,0	4,6
21000	250	1,9	2,0	2,3	3,1
60000	870	0,9	0,9	1,0	1,3

Tabelle I Spezifische Bruttoinvestitionskosten von Gas-WKK-Anlagen für neue Gebäude und die drei Kostenstufen (Kst.) der sanierten Gebäude für das Jahr 2030 (EBF: Energiebezugsfläche).

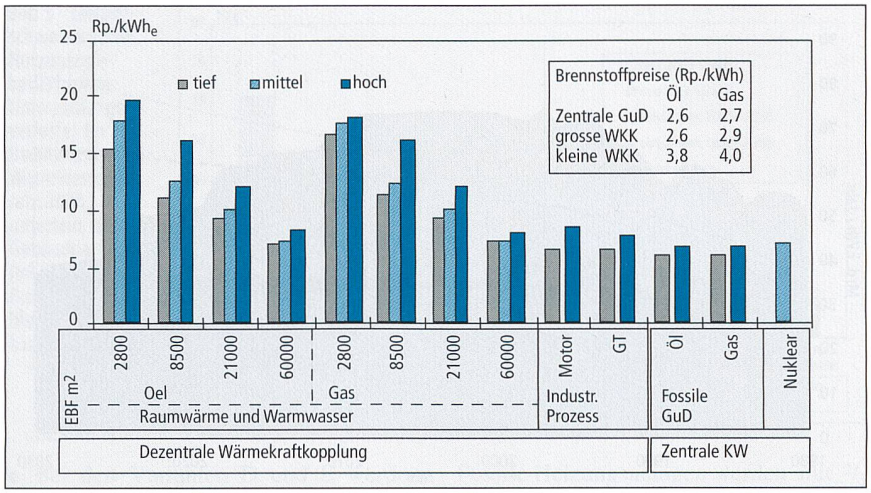


Bild 3 Elektrizitätsgestehungskosten im Jahr 2030. WKK tief: Neue Gebäude und Kostenstufe I der unsanierten Gebäude inkl. Warmwasseraufbereitung. Hoch: Kostenstufe III der sanierten Gebäude ohne Warmwasseraufbereitung. Zentrale Kraftwerke tief: 7300 Volllaststunden im Jahr. Hoch: 4500 Volllaststunden im Jahr (vergleichbar mit der WKK). Investitionskosten der Kraftwerke: Kombi-Kraftwerke: 750 Fr./kW_e; Kernkraftwerke: 3500 Fr./kW_e.

der tiefen Strompreise ist nicht zu erwarten, dass die Preise der WKK-Anlagen steigen werden. Die technischen Verbesserungen werden demzufolge voll an die Kunden, bzw. die Anlagenbetreiber, weitergegeben. Die spezifischen Kosten werden dementsprechend sinken.

Bei den Wärmepumpen wirkt sich der Einfluss der Gebäude vor allem indirekt auf die Wirtschaftlichkeit aus, nämlich über die unterschiedlichen Vorlauftemperaturen. Die erzielbaren thermischen Leistungen bzw. Nutzungsgrade können in unsanierten Gebäuden bei gleicher WP-Maschine bis 40% bzw. 25% abnehmen. Entsprechend erhöhen sich die Investitions- bzw. die Stromkosten. Ausserdem sind grosse Unterschiede bei den Kosten der Wärmequellenerschliessung zu verzeichnen. Die Entwicklung der Kosten über die nächsten Jahre wird durch die Verbesserung der Nutzungsgrade beeinflusst, welche eine entsprechende Reduktion der Stromkosten ermöglicht. Zusätzlich kommt bei kleinen WP-Anlagen der erwarteten Industrialisierung der Produktion (15% tiefere Herstellungskosten für die WP-Maschine [8]) eine ebenbürtige Bedeutung zu.

Entscheidend ist die Kombination Gebäude-Anlage. Die Zuordnung der Anlagen auf die Gebäude wird sich demzufolge im Laufe der Zeit verändern. Durch die verbesserte Gebäudeisolation reduziert sich die Anlagengrösse etwas, was bei WKK-Anlagen dem beschriebenen Trend der spezifischen Kostensenkung entgegenwirkt, die Situation der WP aber tendenziell verbessert.

Die Gestehungskosten der zentralen fossilen Kraftwerke reagieren sensitiv auf die Primärenergiepreise: Eine Preissteigerung von 30% bedeutet eine Erhöhung der Gestehungskosten um 20%. Bei Kernkraftwerken spielen die Kapitalkosten diese Rolle: Variiert man die Investitionskosten um 1000 Franken je installiertes kW_e, so verändern sich die Gestehungskosten um 0,8 Rp./kWh_e (Bild 3).

Beim Vergleich der Gestehungskosten müssen weitere Aspekte im Auge behalten werden:

- Der energiewirtschaftliche Wert des Stroms. So ist Strom, der im Winter produziert wird (z.B. Kombi-KW und WKK), höher zu bewerten als Strom mit ausgeprägtem Bandlastcharakter.
- Der WKK-Strom fällt dezentral und auf einer Spannungsebene an, die näher beim Verbraucher liegt. Dies führt zu geringfügig geringeren Netzverlusten, aber kaum zu Investitionseinsparungen der Netze selber.
- WKK-Anlagen könnten einen Teil der Netzdienstleistungen wie Blindstromkompensation oder Reservehaltung übernehmen, wobei mit Mehrkosten zu rechnen ist.

Über die ökonomische Bewertung dieser Punkte bestehen unterschiedliche Auffassungen, die von beinahe Null bis einige Rp./kWh_e reichen.

Angebot und Nachfrage von Strom und Wärme im Jahre 2030

Der in der Schweiz produzierte Strom basiert seit 1985 auf rund 60% Wasserkraft und 38% Kernenergie. Der Anteil an fossilen und neuen erneuerbaren Systemen ist folglich bei tiefen 2 bis 3%. Zusammen mit den bestehenden Langzeitverträgen mit Frankreich übersteigt

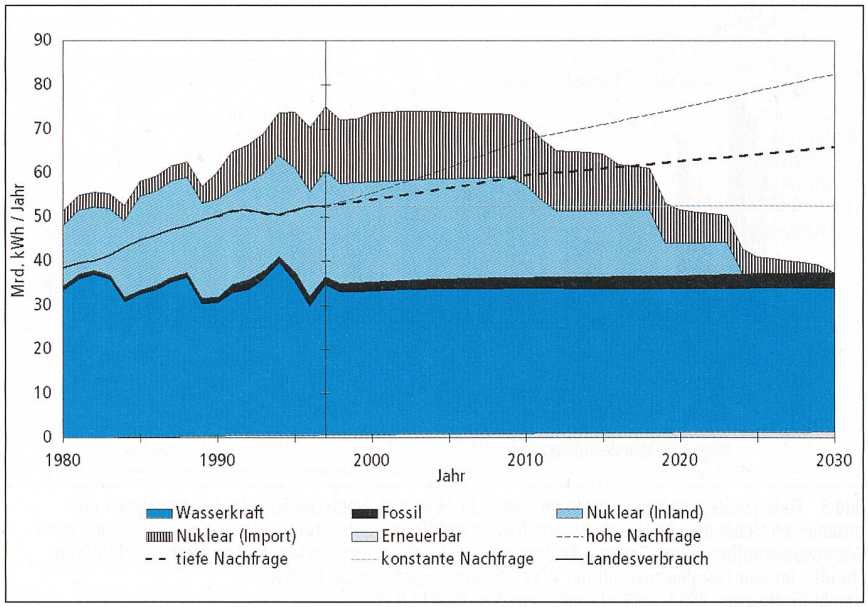


Bild 4 Stromangebot (unterteilt in Wasserkraft, Kernenergie Inland, fossilen Anlagen und Kernenergie Import), die Entwicklung des effektiven Landesverbrauchs der letzten Jahre sowie die Fortschreibung von Angebot und Nachfrage bis zum Jahre 2030.

momentan die zur Verfügung stehende jährliche Strommenge den derzeitigen effektiven Landesverbrauch.

Die längerfristige Entwicklung der ***Elektrizitätsnachfrage*** wird durch komplexe Zusammenhänge mit einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die zum Teil gegenläufige Effekte bewirken: Effizienzverbesserung der Anwendung, Änderungen in der Wirtschaftsstruktur, Zunahme der Bevölkerung, weitere Automatisierung im Industrie- und Dienstleistungssektor usw. Unter der Annahme eines positiven Wirtschaftswachstums wurden in [2] zwei Szenarien untersucht: ***Nachfrage hoch*** geht davon aus, dass der Stromkonsum bis zum Jahre 2010 um jährlich 2% und danach noch um 1% steigen wird. Beim Szenario ***Nachfrage tief*** wurden Wachstumsraten von 1% bzw. 0,5% zugrunde gelegt. Eine detaillierte Beschreibung sämtlicher Annahmen, unter anderem der sozio-ökonomischen Rahmendaten, wird in [2] gemacht.

Bezüglich der Entwicklung des ***Elektrizitätsangebots*** aus dem bestehenden Park werden folgende Annahmen getroffen:

- Ein so genanntes ***Basisangebot*** – bestehend aus Wasserkraft, kleinen fossilen Anlagen und erneuerbaren Energiequellen – von rund 38 800 GWh wird bestehen bleiben.
- Die heute in Betrieb stehenden Kernkraftwerke werden nach Erreichen ihrer Lebensdauer von voraussichtlich 40 Jahren vom Netz genommen.
- Es werden keine neuen Bezugsverträge abgeschlossen.

Unter diesen Voraussetzungen bleibt im Jahre 2030 nur noch das Basisangebot von 38 800 GWh übrig, wovon 34 000 GWh mit Wasserkraft, 3200 GWh mit WKK-Anlagen und 1300 GWh mit thermischen Anlagen zur reinen Stromerzeugung (keine WKK) bereitgestellt werden. Von den 4500 GWh thermisch erzeugter Elektrizität werden rund 1000 GWh mit erneuerbaren Brennstoffen produziert, wobei über die Hälfte aus den KVA stammen. Weitere 300 GWh Strom stammen aus neuen erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik, Wind und Geothermie.

Im Folgenden wird die postulierte Nachfrage tief verwendet, welche einen Landesverbrauch von 65 800 GWh ausweist. Die Differenz zwischen Landesverbrauch und dem angenommenen Basisangebot von 38 800 GWh wird als Strommanko bezeichnet und beläuft sich auf 27 000 GWh. Selbst bei stagnierendem Stromkonsum wird sich spätestens ab dem Jahr 2020 ein Versorgungsengpass ergeben (Bild 4).

Im Gegensatz zur Stromerzeugung mit einer einigermassen überschaubaren Anzahl von Produktionsanlagen wird die Wärme mehrheitlich dezentral, das heisst von einer Vielzahl von Verbrauchern produziert. Deshalb stützt sich die Modellierung der Wärmenachfrage auf Statistiken, Kennzahlen und entsprechende Methoden. Dabei fliessen auch die Ergebnisse der Arbeiten, welche den Energieperspektiven des BFE zugrunde liegen, mit ein [9].

Die zukünftige Wärmenachfrage von 352 PJ setzt sich aus Niedertemperaturwärme (272 PJ) und Industrieprozesswärme (80 PJ) zusammen. Die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung wird mit modellhafter «Bottom-up»-Darstellung des Energiebedarfs beschrieben. Die Projektion auf das Jahr 2030 erfolgt anhand der prognostizierten Entwicklung der Energiebezugsflächen (EBF), den Sanierungsraten und den spezifischen Energiekennzahlen [10,11].

Dank fortlaufenden Gebäudesanierungen und weiteren Verbesserungen im Neubaubereich wird der gesamtschweizerische Nutzenergiebedarf im Jahre 2030 gegenüber dem Stand 1990 nur um 12% steigen, obwohl die EBF gar um 38% zunehmen. Der Endenergieverbrauch wird dank der Steigerung der Nutzungsgrade ungefähr konstant bleiben oder leicht abnehmen.

In Hinblick auf die Zuordnung der Energieanlagen wird der Gebäudepark zusätzlich mit Hilfe verschiedener Statistiken in Grössenklassen unterteilt [11]. Für dieses Projekt wurden die Resultate in einen Datensatz zusammengefasst, welcher zwischen sieben Grössenklassen und fünf Gebäudezuständen (neu und saniert je vor bzw. nach 2005 und unsaniert bis 2030) unterscheidet (Bild 5).

Da auch die Industrie zur Erzielung einer verstärkten Präsenz von WKK-Anlagen interessant ist, wird im Weiteren die Prozesswärme in die verschiedenen Industriezweige bzw. auf die verschiedenen Temperatur- bzw. Enthalpie-Niveaus aufgeteilt und mögliche WKK-Anwendungen branchenspezifisch abgeklärt [12]. Von den total 80 PJ Prozesswärme (ohne Elektrizität) werden rund 18 PJ als Basisentwicklung behandelt, wobei 10,5 PJ in WKK erzeugt werden. Der Rest der Prozesswärme von rund 62 PJ wird für die neuen Versorgungsvarianten offen gelassen (Tabelle II).

Angebotsseitig wird auch bei der Niedertemperaturwärme (Raumwärme- und Warmwasser) eine Basisentwicklung untersucht. Es wird angenommen, dass erneuerbare Energiequellen auf Kosten fossiler Energieträger weiter an Marktanteilen gewinnen werden [13]. Für diese Basisentwicklung wurde für die nächsten 30 Jahre die Annahme getroffen , dass die Holzverwertung verdoppelt wird, Wärmepumpen eine Zunahme von 18 PJ erfahren und die Wärmenutzung aus Sonnenkollektoren vervierfacht wird. Ausserdem wird angenommen, dass der Anteil der Elektroheizungen auf 8 PJ halbiert wird und weitere 8 PJ in WKK-Anlagen bereitgestellt werden. Der verbleibende Niedertemperaturwärmebedarf von rund 195 PJ wird für die Definition der neun Energieversorgungsvarianten offen gelassen.

Der totale in den Dezentral-Varianten behandelte Wärmebedarf beläuft sich somit auf knapp 258 PJ.

Neun Versorgungsvarianten

Mit den beschriebenen Grundlagedaten – kategorisierter Wärmebedarf und Strommanko für das Jahr 2030 – ist es möglich, verschiedene Energieversorgungsvarianten zu definieren und deren ökonomischen und ökologischen Auswirkungen zu vergleichen. Wichtig ist dabei, dass die Varianten den gleichen Nutzen aufweisen, das heisst die Elektrizitätsproduktion sollte ungefähr das gleiche zeitliche Lastverhalten haben.

Da die Basisentwicklung für Strom (38 800 GWh) und Wärme (95 PJ) bei allen Varianten gleich ist, werden vorerst nur die Resultate der Mankodeckung der Strom- und Wärmeversorgung ausgewiesen.

Die einzelnen Varianten werden durch die Mankodeckung (27 000 GWh Strom und 258 PJ Wärme) charakterisiert und können in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Bei den ersten drei Varianten beruht die Wärme-Mankodeckung ausschliesslich auf der Basis von fossilen Heizkesseln. Das Strommanko wird dabei mit zentralen Grosskraftwerken (A: 100% Kombi-KW, B: 100% KKW und C: KKW wie heute und der Rest Kombi-KW) gedeckt.

Wärme Total 2030	**352 PJ**
a) Raumwärme / Warmwasser	272 PJ
b) Prozesswärme	80 PJ
Basisentwicklungen bis 2030	**95 PJ**
a) Raumwärme	77 PJ
Wärmepumpen	24 PJ
Holzheizungen	20 PJ
Wärmekraftkopplung	8 PJ
Elektro (Heizungen u. Boiler)	20 PJ
Sonnenkollektoren	5 PJ
b) Industrie	18 PJ
Prozess-Wärmekraftkopplung	11 PJ
Konventionelle Prozesswärme	7 PJ
«Mankodeckung» 2030	**258 PJ**
a) Raumwärme	195 PJ
b) Industrie	62 PJ

Tabelle II Gesamtschweizerischer Wärmebedarf für die Schweiz im Jahr 2030 unterteilt nach Basisentwicklung und Anteilen, die in den Dezentral-Szenarien variiert werden können (Mankoabdeckung 2030).

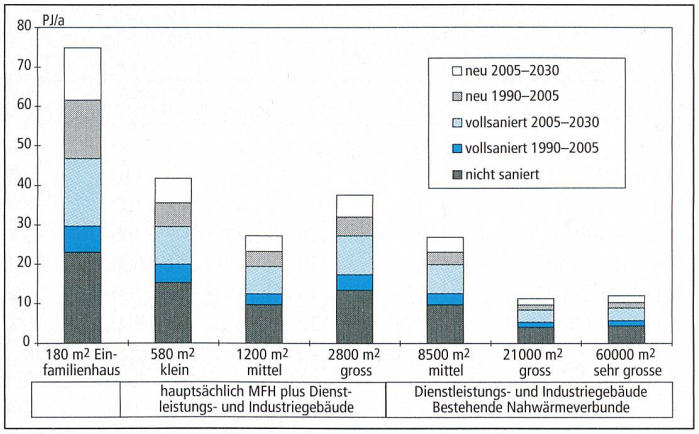


Bild 5 Gesamtschweizerischer Nutzenergiebedarf (ohne Umwandlungsverluste) für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2030, unterteilt nach Gebäudegrössen (m² EBF) und Zustand (MFH: Mehrfamilienhaus).

- Bei den Varianten D und E werden 5 TWh_e aus WKK-Anlagen bereitgestellt. Der Rest des Strommankos wird entweder mit Kombi-KW oder KKW gedeckt. Der Wärmebedarf wird durch konventionelle fossile Anlagen ergänzt.
- Die Varianten F und G beinhalten netto gleichviel Strom aus WKK-Anlagen wie die Varianten D und E. Es wird jedoch gefordert, dass der Strom aus WKK-Anlagen quasi CO_2-neutral sein soll, was durch Substitution fossiler Heizkessel durch Wärmepumpen bewerkstelligt wird. Der für die Wärmepumpen zusätzlich benötigte Strom wird ebenfalls in WKK-Anlagen bereitgestellt.
- Die letzten beiden Varianten beinhalten gleich viele Wärmepumpen wie F und G mit dem Unterschied, dass der dafür benötigte Strom zentral bereitgestellt wird.

Bei allen Varianten wurden die Öl- bzw. Erdgasanteile gleich festgelegt: Fossile Heizungsanlagen werden mit $^2/_3$ Öl und $^1/_3$ Erdgas betrieben. Bei WKK-Anlagen wurde das Verhältnis gerade umgekehrt ($^1/_3$ bzw. $^2/_3$) gewählt. Die fossilen Kombi-KW werden zu 75% mit Gas und zu 25% mit Öl gefeuert (Bild 6).

Die Erneuerung der Heizungsanlagen ist ein kontinuierlicher Prozess, der von der Ausfallwahrscheinlichkeit der Energiesysteme und den Sanierungsraten abhängt. Bei der Zuordnung der vorgegebenen WKK-Menge (Tabelle III) auf die Gebäudekategorien wurden ausser den reinen Gestehungskosten weitere Faktoren wie die betriebswirtschaftliche Situation und Heizungsersatzraten berücksichtigt. Wie die Untersuchungen in diesem Projekt gezeigt haben, spielen die Gebäudeattribute saniert und unsaniert eine untergeordnete Rolle. Um die für das Jahr 2030 angenommenen Anteile zu erreichen, muss die Markteinführung neuer Technologien (wie Mini-BHKW oder Brennstoffzellen) bereits in den nächsten Jahren erfolgen und die Verbreitung der bereits heute verfügbaren

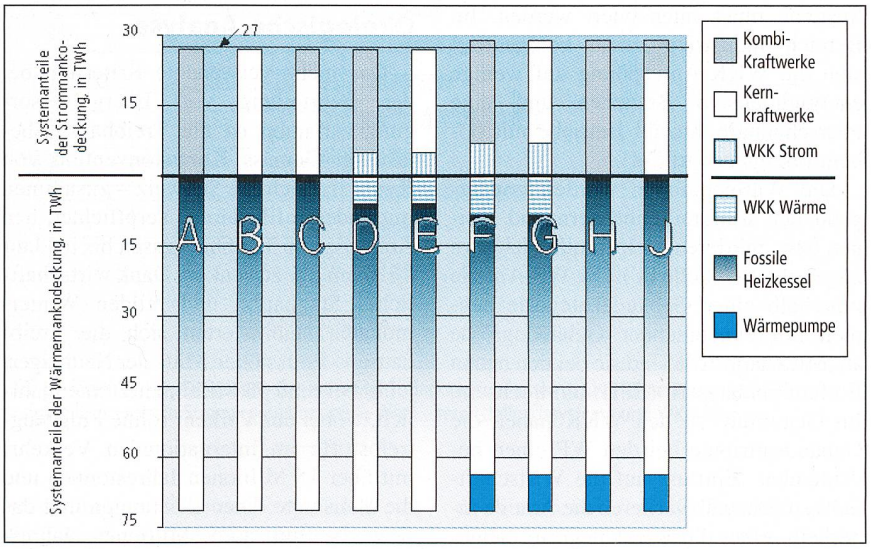


Bild 6 Anteile der verschiedenen Energiesysteme zur Mankodeckung Nutzwärme (TWh_{th}) und Elektrizität (TWh_e) der betrachteten Varianten.

	Basis 2030		Mankodeckungs-Varianten (zusätzlich) D E		F G	
	Ant	GWh_e	Ant	GWh_e	Ant	GWh_e
EFH	0%	20	1%	110	2%	160
Kleine MFH	0%	20	2%	110	4%	220
Mittlere MFH	1%	30	4%	100	8%	210
Grosse MFH	2%	110	8%	460	13%	740
Gebäude 8500 m²	6%	310	32%	1600	43%	2200
Gebäude 21000 m²	18%	410	31%	700	38%	900
Gebäude 60000 m²	18%	510	31%	900	39%	1100
Total Raumwärme		1420		4000		5500
Raffinerie	11%	210	11%	250	11%	250
Nahrungsmittel	14%	100	16%	200	24%	300
Papier	42%	500	8%	100	13%	150
Chemie/Pharma	22%	400	14%	300	21%	450
Andere				150		200
Total Industrieprozesse		1210		1000		1350
Andere WKK		670				
Total WKK		3300		5000		6850

Tabelle III Allokation der betrachteten WKK zu den Kategorien. «Ant» gibt den Anteil der WKK in jeder Wärmemarktkategorie an. Die Anteile und die erzeugte Strommenge (GWh_e) der Mankodeckungs-Varianten sind als «zusätzlich zur Basisentwicklung» zu verstehen.

	Basis 2030						Mankodeckungs-Varianten (zusätzlich zu Basis 2030)					
	neu		vollsaniert		unsaniert		neu		vollsaniert		unsaniert	
	Ant.	PJ	Ant.	PJ	Ant.	PJ	Ant	PJ	Ant.	PJ	Ant.	PJ
EFH	32%	10,4	13%	3,5	5%	1,3	11%	3,7	14%	3,7	12%	3,2
Kleine Gebäude	15%	2,3	8%	1,5	3%	0,6	17%	2,7	18%	3,2	11%	2,1
Mittlere Gebäude	11%	1,1	6%	0,7	2%	0,2	15%	1,5	13%	1,5	13%	1,6
Übrige	6%	1,5	2%	0,6	1%	0,2	6%	1,6	5%	2,1	4%	1,6
Total		15,3		6,4		2,3		9,5		10,5		8,4

Tabelle IV Allokation der betrachteten Wärmepumpen (WP) zu den Kategorien. «Ant» gibt den Anteil der WP in jeder Wärmemarktkategorie an. Die Anteile und der durch die WP gedeckte Nutzenergiebedarf (PJ) der Mankodeckungs-Varianten sind als «zusätzlich zur Basisentwicklung» zu verstehen.

Systeme muss intensiviert werden. Im Bereich Industrieprozesse konzentriert sich die WKK-Anwendung auf wenige energieintensive Branchen und eine überschaubare Anzahl Betriebe mit hohem Energiebedarf [14].

Die Wärmepumpen wurden vorwiegend den Einfamilienhäusern und kleinen bzw. mittleren Mehrfamilienhäusern zugeordnet (Tabelle IV). Die WP-Anteile innerhalb einer Gebäudekategorie nehmen mit zunehmender Gebäudegrösse ab. Mit knapp 50% sind sie bei den neuen Einfamilienhäusern (EFH) am höchsten. Im Gegensatz zu den WKK haben die Gebäudeattribute bei den WP einen bedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Deshalb variieren die Anteile innerhalb einer Grössenkategorie, abgestuft nach neu, saniert, unsaniert, um etwa einen Faktor zwei.

Ökologische Analyse

Das meist verwendete Kriterium bei der Beurteilung von Energieversorgungsvarianten ist die Treibhausgasbelastung. Gemäss Klimakonvention von Kyoto hat sich die Schweiz – zusammen mit anderen Ländern – verpflichtet, den Ausstoss von Treibhausgasen bis ins Jahr 2010 um 8% zu senken. Dank wirtschaftlicher Stagnation und milden Wintermonaten stabilisierten sich die Treibhausgas-Emissionen Mitte der Neunzigerjahre bei rund 53 Millionen Tonnen jährlich, wobei der Verkehr (ohne Flugzeugtreibstoffe im internationalen Verkehr) mit über 15 Millionen Jahrestonnen und die Haushalte, Dienstleistungen und das Gewerbe mit 17.5 Millionen Jahrestonnen beitragen (Industrie 8 Millionen Tonnen pro Jahr). Da der grösste Teil der in der Schweiz produzierten Elektrizität in Kernkraftwerken oder durch die Nutzung der Wasserkraft erzeugt wird, trägt die Elektrizitätswirtschaft bisher nur unbedeutend zum Schweizer Treibhausgasinventar bei. Im Gegensatz zur nationalen Treibhausgas-Statistik wurden in diesem Projekt die ganzen Energieketten – ohne Berücksichtigung geografischer oder politischer Grenzen – bilanziert (d.h. direkte und graue Emissionen). Die in den Varianten berechneten Emissionsfrachten sind deshalb nicht unmittelbar mit der Statistik vergleichbar.

Bild 9 zeigt die totalen Treibhausgasemissionen der Mankodeckung (ohne Basis) unterteilt in die Kategorien reine Stromerzeugung, Wärmekraftkopplung und reine Wärmeerzeugung.

Die Varianten A, B und C mit fossilen Heizkesseln zeigen die erwartete Abhängigkeit von der gewählten zentralen Stromerzeugung: Je mehr Strom fossil erzeugt wird, desto höher die Treibhausgasbelastung. Wird fossile Stromproduktion vorausgesetzt, vermögen WKK-Anlagen die Treibhausgasbelastung leicht zu senken (Vergleich A mit D), wobei der positive Einfluss zusätzlicher Wärmepumpen weit stärker ist (Vergleich D mit F/H).

Bei weiterhin nuklearer Deckung, zusätzlich kombiniert mit WKK, nehmen die CO_2-äquivalent-Emissionen gegenüber konventionellen fossilen Heizungen um knapp 10% zu (Vergleich B mit E). Dass bei den «CO_2-neutralen» Varianten F und G die Menge an Treibhausgasen aus WKK und konventioneller Wärme dem Stand der Variante B entspricht, ergibt sich aus der Definition dieser Varianten. Interessant bei diesen Szenarien ist deshalb hauptsächlich, wieviel zusätzlicher Strom benötigt wird und wie sich diese zusätzliche Produktion auf die anderen Luftschadstoffe auswirkt.

Vergleicht man Varianten mit vorwiegend fossiler Stromerzeugung (A,D,F,H) mit den nuklearen Varianten (B,C,E,G,I), so nehmen die Treibhausgas (THG)-Emissionen zwischen 30 bis 50% zu. Wird die Wärmepumpenmenge, die zum Erreichen der CO_2-Neutralität von WKK-Anlagen benötigt wurde (F und G), beibehalten und der Strom ausschliesslich mit zentralen Anlagen produziert (H und I), erhöht sich bei fossil-zentraler Stromproduktion der Ausstoss von THG gegenüber Variante F geringfügig. Bei gemischter Stromproduktion (analog C) erhält man trotz 6,9 TWh Strom aus Kombi-Kraftwerken nur um 2% höhere Werte als bei Variante B.

Obwohl die Reihenfolge der Varianten nicht beeinflusst wird, zeigen die Resultate der LCA-Berechnungen, dass die Beträge der vor- und nachgelagerten Prozessschritte bis 20% ausmachen können und somit selbst für die TG-Emissionen nicht vernachlässigbar sind. Noch frappanter wird dieser Aspekt bei den übrigen untersuchten Schadstoffen: ihre nicht direkt aus dem Kraftwerk stammenden Anteile können hoch sein (NO_x, SO_x und CO) bzw. die totalen Emissionen dominieren (NMVOC und Partikel) und in jedem Fall das Ranking verändern.

Die totalen SO_x- und NMVOC-Emissionen hängen vorwiegend vom Ölanteil der definierten Varianten ab, wobei bei den NMVOC-Emissionen der Hauptanteil aus der Rohölförderung stammt. Immerhin kann festgestellt werden, dass die direkten NMVOC-Emissionen aus den Anlagen bei den Varianten mit WKK rund zweimal höher sind als bei den anderen, was unter Umständen Auswirkungen auf gesundheitsrelevante Grenzwerte in stark belasteten Ballungsgebieten haben kann.

Die Grenzwerte von Kohlenmonoxid- (CO) und Stickoxid-Emissionen (NO_x) werden in der Luftreinhalteverordnung (LRV) geregelt. Die der Analyse zugrunde gelegten Systeme erfüllen die Grenzwerte allesamt. Dennoch werden die jährlichen Schadstofffrachten der Varianten untersucht, da die umwelt- und gesundheitspolitische Relevanz gegeben ist und die Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von motorbetriebenen WKK-Anlagen gezeigt werden soll.

Die direkten CO-Emissionen sind bei den Varianten mit WKK-Anlagen (D bis G) am höchsten (Bild 8). Sogar Variante A mit reinen fossilen Kraftwerken stösst direkt weniger CO aus als Variante E mit 5 TWh_e WKK-Strom. Die geringste totale CO-Belastung wird mit der Kombination WP/Kraftwerksmix verursacht (Variante I). Der Anteil der direkten Emissionen aus den Anlagen beträgt zwischen 33 und 50%.

In Bezug auf totale NO_x-Emissionen schneidet Variante B am Besten ab. Der Anteil der direkten NO_x-Emissionen liegt zwischen 38 und 44%. Im Gegensatz zu den Treibhausgasen vermögen WKK-Anlagen bei vorausgesetzter fossiler Stromproduktion (A,D,F,H) die NO_x-Emissionen nur zu senken, wenn gleichzeitig ein Teil der konventionellen Heizkessel durch Wärmepumpen ersetzt wird (F und H). Bei weiterhin nuklearer Mankodeckung und WKK nehmen die NO_x-Emissionen gegenüber den konventionellen Heizungen und nuklearer Stromerzeugung um 10% zu (Vergleich B mit E). Die rein fossilen Varianten verzeichnen gar einen Anstieg von bis 40%. Wie bei den Resultaten der TG-Emissionen üben auch bei den NO_x-Emissionen die Wärmepumpen und die Kernenergie den eigentlichen positiven Effekt auf die totalen Emissionen aus (Bild 9).

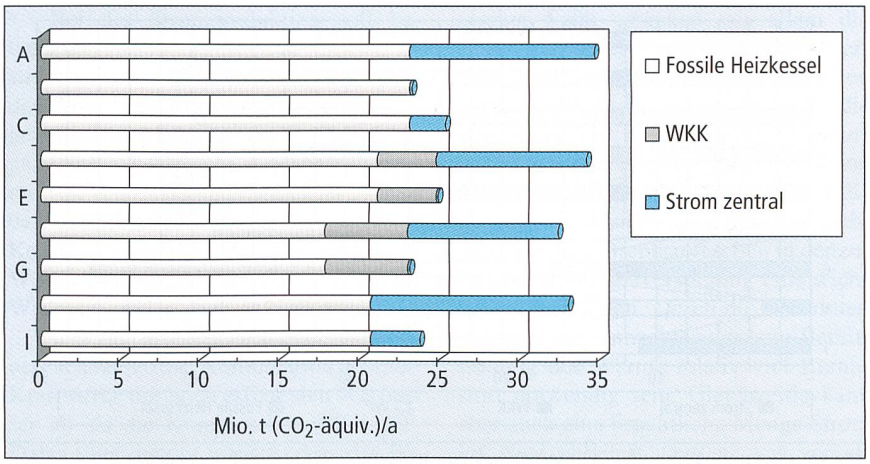


Bild 7 Jährliche Treibhausgas-Emissionen der Mankodeckung nach (IPCC 1996), [15] mit einem Zeithorizont von 100 Jahren der neun Varianten (A bis I, ohne Basisangebot).

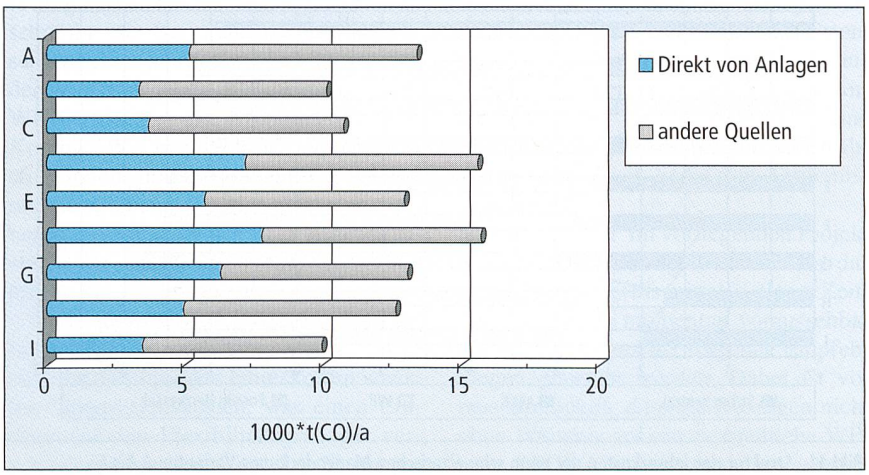


Bild 8 Jährliche CO-Emissionen der neun Mankodeckungsvarianten A bis I (ohne Basisangebot), aufgeteilt in direkte und indirekte Beiträge.

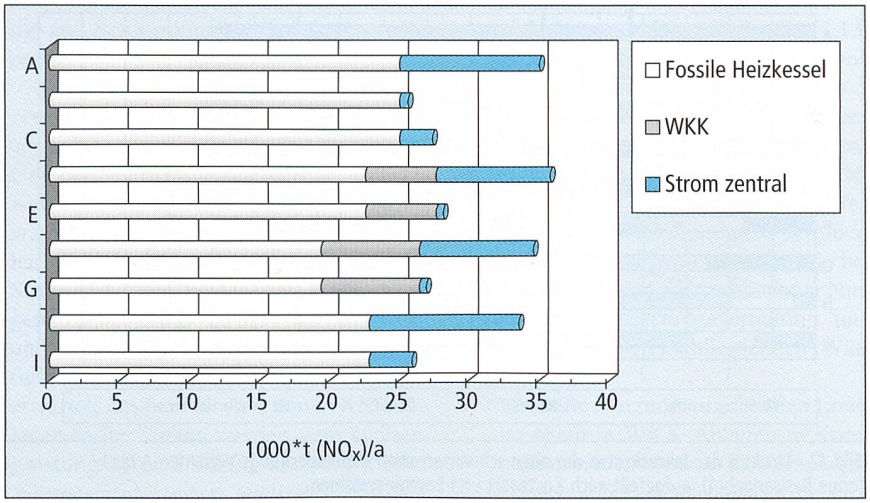


Bild 9 Jährliche NO_x-Emissionen der neun Mankodeckungsvarianten A bis I (ohne Basisangebot), aufgeteilt in zentrale Stromproduktion, reine Wärmebereitstellungssysteme und WKK-Anlagen.

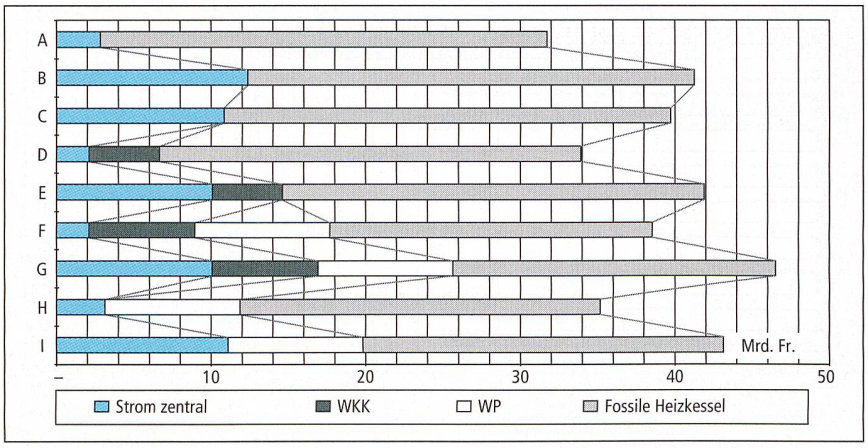


Bild 10 Investitionskosten der neun Mankodeckungs-Varianten A bis I (ohne Basisangebot), aufgeteilt nach Energiesystemen.

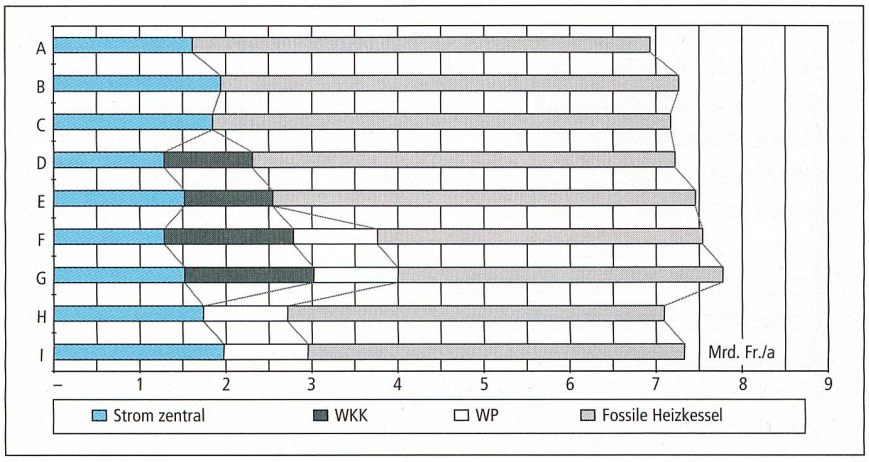


Bild 11 Struktur der Jahreskosten der neun schweizerischen Mankodeckungs-Varianten A bis I (ohne Basisangebot), aufgeteilt nach Energiesystemen.

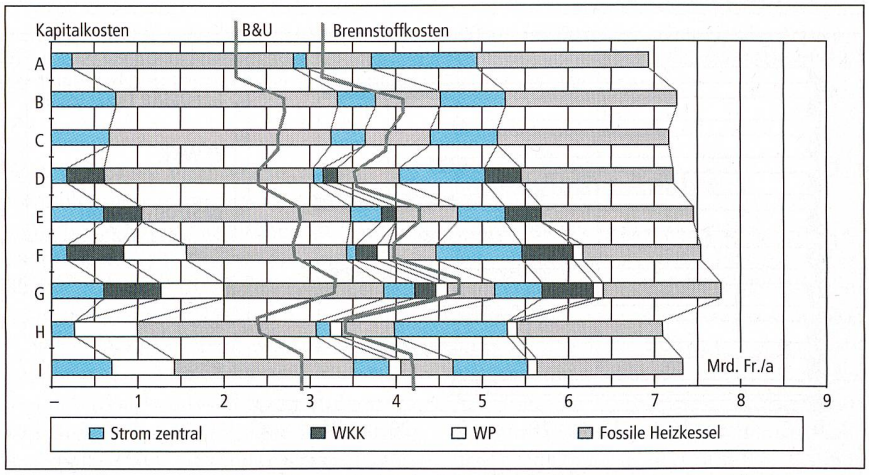


Bild 12 Struktur der Jahreskosten der neun schweizerischen Mankodeckungs-Varianten A bis I (ohne Basisangebot), aufgeteilt nach Kostenart und Energiesystemen.

Ökonomische Analyse

Ein wichtiges wirtschaftliches Kriterium stellen die ***Investitionskosten*** dar (Bild 10). Auffallend ist, dass die Investitionen im reinen Strombereich nur zwischen 10 und 25% ausmachen. Die Investitionskosten werden von den Anlagen in den Gebäuden dominiert, weil die dafür zu erzeugende Wärmemenge grösser ist als die zu erzeugende Strommenge und weil die Kosten kleiner Heizungsanlagen spezifisch sehr hoch liegen (Skalierungseffekt).

Die Hauptunterschiede zwischen den Varianten liegen hauptsächlich zwischen jenen mit Kernenergie (B, C, E, G, I) und jenen ohne (A, D, F, H). Bezogen auf das Total ergibt sich zwischen Varianten mit gleichen WKK- bzw. WP-Anteilen ein Mehrinvestitionsbedarf von 20 bis 25%. Werden andererseits die Varianten mit (ungefähr) gleichem Nuklearanteil verglichen, wird ein stetig steigender Mehrinvestitionsbedarf der Varianten mit WKK (D, E), mit WP (H, I) und der Kombination WKK und WP (F, G) ersichtlich. Mit 5 bis 7%, 9 bis 11% und 17 bis 21% sind die Unterschiede allerdings geringer als diejenigen zwischen den Varianten mit bzw. ohne Kernenergie.

Noch wichtiger als die Investitionskosten sind die jährlich anfallenden ***Gesamtkosten*** für Kapital, Betrieb und Unterhalt sowie Brennstoff (Bild 11). Weil die Varianten den gleichen Nutzen aufweisen, sind die Jahreskosten ein Indikator für die ökonomische Effizienz.

Die gesamten Jahreskosten der Mankodeckung der betrachteten Varianten (Bild 12) betragen gut 7 Mrd. Franken pro Jahr, unter Einbezug der Basis rund CHF 13 Mrd. Augenfällig ist, dass der Unterschied zwischen den Varianten relativ klein ist (höchstens 10%). Die Charakteristik der Unterschiede zwischen den Varianten folgt einem ähnlichen Muster wie die Investitionskosten: Die Varianten mit nuklearer Stromerzeugung sind teurer als die vergleichbaren mit fossiler Stromerzeugung. Die Varianten mit WP, diejenigen mit WKK und die kombinierten WP-WKK-Varianten weisen sukzessive leicht höhere Jahreskosten auf. Einzig die WKK- bzw. die WP-Varianten sind gegenüber den Investitionskosten in der Reihenfolge vertauscht.

Die Nivellierung der Unterschiede rührt unter anderem daher, dass die hohen Investitionskosten der Varianten mit Nuklearenergie über einen längeren Zeitraum abgeschrieben werden als die fossilen zentralen Kraftwerke (40 bzw. 20 Jahre) und, dass die investitionsleichten fossilthermischen Kraftwerke brennstoffkostenintensiver sind, wie aus Bild 12 ersichtlich ist (zu vergleichen sind paarweise A/C, D/E, F/G, H/I).

Die bei den Investitionskosten ersichtliche Dominanz der Gebäudeanlagen wird bei den Jahreskosten etwas gebrochen, da die Unterschiede zwischen den spezifischen Unterhalts- bzw. Brennstoffkosten kleiner sind. Die Jahreskosten des Bereichs zentrale Stromerzeugung liegen zwischen 17 und 27% des Totals der betrachteten Varianten.

Bei allen Varianten fällt fast die Hälfte (40 bis 50%) der Jahreskosten auf die Kapitalkosten. Wichtig sind aber auch die Brennstoffkosten, die mit einem Drittel bis zu 45% zu Buche schlagen. Von eher untergeordneter Bedeutung sind demgegenüber die Betriebs- und Unterhaltskosten mit rund 15%. Wie aus Bild 12 ersichtlich, sind die Unterschiede des Totals der Varianten gering, weil sich verschiedene Trends gegenseitig beinahe aufheben. So sind kapitalintensivere Anlagen weniger brennstoffkostenintensiv und umgekehrt. Da die Unterschiede der spezifischen Gestehungskosten der eingesetzten Anlagen nicht gross sind, gilt dies natürlich auch für das Totalergebnis. Ausserdem werden sie nivelliert, da die Varianten einen gemeinsamen Sockel von Anlagen aufweisen, welcher beinahe 40% ausmacht.

Schlussfolgerungen

Will man Verpflichtungen auf nationaler und internationaler Ebene durch Handeln in der Schweiz nachkommen, das heisst die Treibhausgas-Emissionen stabilisieren bzw. reduzieren, darf naturgemäss der Verbrauch fossiler Brennstoffe nicht steigen. Für eine Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe spricht ausserdem die damit erreichbare Reduktion von Luftschadstoffen wie NO_x, CO, SO_x, NMVOC oder Partikel, deren direkten oder indirekten Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt unter speziellen Bedingungen bereits heute spürbar werden (troposphärische Ozonbelastung).

Aus der Analyse von Varianten der zukünftigen Energieversorgung können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die verschiedenen Anlagetypen oder Kombinationen davon müssen immer im Kontext der landesweiten Energieversorgung, insbesondere der Infrastruktur, betrachtet werden. Vergleiche auf Anlagenebene sind in Bezug auf Entscheidungsfindungen ungenügend.
- Keine der definierten Varianten kann eindeutig favorisiert werden.
- Ein Technologiemix scheint attraktiv zu sein. Bezüglich der dezentralen Versorgungsvarianten führt das Überschreiten von massvollen Expansionsmengen dazu, dass die Vorteile vermindert werden und die Nachteile dominieren. Insbesondere sind die Potenziale der erneuerbaren Energien, der WKK, aber auch der WP begrenzt, und die Kosten nehmen mit zunehmender Potenzialausschöpfung zu.

Bei der Stromproduktion soll betreffend Treibhausgase und Luftschadstoffe soweit wie möglich am bestehenden Mix Wasserkraft/Kernenergie festgehalten werden. Saisonale Zusatzkapazitäten – verursacht durch die Zunahme von Wärmepumpenheizungen – werden vorteilhaft durch moderne zentrale Kombi-Kraftwerke oder kostengünstige WKK-Anlagen mit hohen elektrischen Wirkungsgraden gedeckt.

Unter den fossilen Versorgungsoptionen schneidet die Kombination Kombi-Kraftwerke mit hoch effizienten WP besser ab als die Kombination WKK-WP, Dabei muss betont werden, dass das Potenzial hoch effizienter WP durch die limitierte Verfügbarkeit von geeigneten Wärmequellen und günstigen Rahmenbedingungen seitens der Gebäude beschränkt ist. Bei tieferen bzw. durchschnittlichen jährlichen Nutzungsgraden der WP (Bezugsjahr 2030) kann die WP-WKK-Strategie die Kombination WP-Kombi-KW bezüglich Treibhausgasemissionen übertreffen, falls moderne motorbetriebene WKK-Anlagen im höheren Leistungsbereich oder Brennstoffzellen für die Stromversorgung der WP eingesetzt werden.

Die Unterschiede der Jahreskosten für die Varianten sind klein. Stärker differiert die Struktur der Jahreskosten sowie der Investitionskosten, was einen Einfluss auf den Flexibilitätsgrad der verschiedenen Varianten hat. Die Varianten mit Kernenergie bedingen hohe Investitionen, die lange gebunden bleiben. Dafür sind sie – im Gegensatz zu den fossil basierten Varianten – nur wenig anfällig auf Schwankungen der Brennstoffpreise.

Tiefe Stromgestehungskosten sind in zentralen Grossanlagen zu erzielen. Aber auch dezentral kann – in beschränktem Umfang – Strom wirtschaftlich erzeugt werden, zum Beispiel in grossen Raumwärme-WKK-Anlagen und in industriellen WKK-Anlagen. Die spezifischen Stromgestehungskosten der WKK hängen in erster Linie von der Anlagengrösse und erst in zweiter Linie von gebäudeseitigen Rahmenbedingungen ab. Es wird erwartet, dass die Kosten von WKK-Anlagen weiter sinken werden – im kleinen Leistungsbereich stärker als im grossen. Wärmeseitig weisen auch die Wärmepumpen ein beachtliches Kostensenkungspotenzial auf, da sich die industrielle Fertigung im kleinen Leistungsbereich mit hohen Jahresnutzungsgraden durchsetzen wird.

Brennstoffzellen versprechen, neue Wege der Energieversorgung zu öffnen, speziell im dezentralen Markt. Aus technischer Sicht sprechen vor allem die erwarteten hohen und von der installierten Leistung unabhängigen elektrischen Wirkungsgrade für diese Systeme, die ausserdem ein exzellentes Teillastverhalten, geringe Geräusch- und fast keine direkten Luftemissionen aufweisen. Falls dies zu wirtschaftlichen Kosten erreicht wird, könnten Brennstoffzellen in der zukünftigen Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen. Durch die erwarteten hohen Stromkennzahlen wird zur Bereitstellung der Wärme relativ viel Brennstoff notwendig sein. Gleichzeitig kann aber auch eine beachtliche Menge Strom ins Netz geliefert werden, was vor allem aus ökonomischer Sicht wünschenswert ist. Werden in einer bestimmten Anzahl von Gebäuden Brennstoffzellen statt konventionelle WKK-Anlagen installiert, so wird dieser zusätzliche Strom je nach Variante entweder Strom aus Kernkraftwerken oder aus fossilen Anlagen ersetzen, was im ersten Fall eine Zunahme und im zweiten Fall eine Abnahme der fossil bedingten Luftemissionen bewirkt.

Aufgrund der im vorliegenden Projekt gemachten Erfahrungen können für das Handeln in kurz- bis mittelfristigem Zeitraum und beim momentan voraussehbaren Stand der Technik folgende Empfehlungen gemacht werden. Dabei ist vorauszuschicken, dass die Aussagen nicht ohne Weiteres auf unterschiedliche WP- oder WKK-Anteile extrapoliert werden dürfen:

- Vermehrter Einsatz von regenerativen Energiequellen, wobei vor allem wärmeseitig signifikante Anteile erreicht werden können. Die PSI-Studie [4,13] weist einen maximalen Anstieg von heute 17 PJ auf rund 61 PJ aus.
- Forcierte Nutzung von Wärmepumpen für die Bereitstellung von Heizwärme bei günstigen Voraussetzungen. Der Einsatz von fossilen Brennstoffen kann durch Wärmepumpen optimiert werden. Tiefe Kosten fallen an bei kleinen Anlagen, bei vorhandener Niedertemperaturheizungsverteilung und bei günstig zu erschliessenden Wärmequellen.
- Rationelle Nutzung von fossilen Energieträgern in WKK-Anlagen in Kombination mit modernen Kesselanlagen in grossen Gebäuden und für die Prozesswärmebereitstellung.
- Nutzung von WP, um den Einsatz von fossilen Brennstoffen optimal zu nutzen und damit die ökologischen Auswirkungen zu reduzieren. Dabei ist die Kombination Kombikraftwerke-WP der Kombination WKK-WP vorzuziehen.

Ausblick

Eine ganzheitliche Beurteilung sollte weitere Faktoren berücksichtigen, wie die Risiken schwerer Unfälle, Abfälle, Emissionen in Wasser und sozio-ökonomische Aspekte, insbesondere die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und die Innovationsfähigkeit der Wirtschaft. Im Projekt GaBE werden diese Fragen weiter untersucht, und es wird ein Werkzeug entwickelt, das die Analyse von Energiesystemen und Versorgungsszenarien in einer integrierten Weise erlaubt (Multikriterienanalyse).

Ausserdem müssen die angenommenen Rahmenbedingungen, wie die prognostizierten Entwicklungen der Strom- und Wärmenachfrage und des Energieträgermixes, im Sinne einer Sensitivitätsanalyse hinterfragt werden. So wurden im Projekt GaBE die hier gezeigten neun Varianten unter Berücksichtigung eines starken Ausbaus neuer erneuerbarer Energien und der Nutzung von Sparpotenzialen untersucht [4,5,6]. Es wird angenommen, dass bei der Wärmeversorgung die Sparmassnahmen/Effizienztechniken und die erneuerbaren Energiesysteme weitere 90 PJ an fossilen Heizkesseln ersetzen. Stromseitig wird das Manko um 10000 GWh reduziert und zusätzlich mit 1500 GWh neuen erneuerbaren Energien gedeckt. Das übrigbleibende Manko wird nach den gleichen Grundsätzen wie in den Dezentralvarianten gedeckt. In Bezug auf Treibhausgasemissionen und Jahreskosten können die neuen Varianten in zwei Gruppen zusammengefasst werden.

- Könnte man durch Sparmassnahmen den Wärmebedarf gegenüber heute um 10% senken, den Strombedarf auf dem Niveau von heute halten und den Anteil neuer erneuerbarer Energien markant erhöhen, würden die Treibhausgasemissionen leicht unter das Niveau von 1990 sinken, auch wenn auf die Kernenergie verzichtet und ein grosser Teil der Versorgung fossil erzeugt wird. Diese Variante führt aber zu wesentlich höheren Kosten.
- Eine gegenüber heute grosse Treibhausgasreduktion bringt die Variante mit nuklearer Stromversorgung, kombiniert mit den Sparmassnahmen und der stark forcierten Erhöhung der erneuerbaren Energien. Allerdings wäre dies noch etwas teurer.

Die Untersuchungen zeigen, dass auch hier keine der Varianten nur Vorteile bietet. Es ist ein Energiemix anzustreben, der ökologische und ökonomische Gesichtspunkte berücksichtigt. In die Überlegungen zur Reduktion von Treibhausgasen müssen auch alle anderen Bereiche einbezogen werden, insbesondere der Verkehr, der in der Schweiz für rund ein Drittel der CO_2-Emissionen verantwortlich ist.

Referenzen

[1] *U. Gantner, M. Jakob* und *S. Hirschberg*: Methoden und Analysen – Grundlagen sowie ökologische und ökonomische Vergleiche von zukünftigen Energieversorgungsvarianten der Schweiz. Beitrag zum VSE-Projekt «Dezentral – Möglichkeiten, Grenzen und Auswirkungen einer verstärkt dezentralen Stromproduktion aus nicht erneuerbaren Energieträgern», PSI-Bericht 00-xx, Villigen (2000).

[2] Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke: Vorschau 1995 auf die Elektrizitätsversorgung in der Schweiz bis zum Jahr 2030. VSE, Zürich (1995).

[3] *R. Dones, U. Gantner, S. Hirschberg, G. Doka and I. Knöpfel*: Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland. PSI-Bericht Nr. 96-07, Villigen (1996).

[4] *S. Hirschberg* (Ed.): Energiespiegel – Facts für die Energiepolitik von Morgen. Nr.1/1999, Newsletter des Projektes GaBE, Paul Scherrer Institut, Villigen (1999).

[5] *S. Hirschberg* (Ed.): Energiespiegel – Facts für die Energiepolitik von Morgen. Nr.2/2000, Newsletter des Projektes GaBE, Paul Scherrer Institut, Villigen (2000).

[6] *U. Gantner, M. Jakob, S. Hirschberg*: Perspektiven der zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz unter Berücksichtigung von nachfrageorientierten Massnahmen – Ökologische und ökonomische Betrachtungen. Hintergrundpapier zu Energiespiegel Nr. 1 und Nr. 2, basierend auf [1], Villigen (2000).

[7] *H. Reichenbach, J. Hubler*: Investitionskosten Gas-WKK-Anlagen in bestehenden Gebäuden. Im Auftrag des PSI, IWK, Zürich, (1997).

[8] *M. Zogg*: Modifizierte Anforderungsliste zur SRHP Swiss Retrofit Heat Pump für ein gemeinsames Projekt der drei erstplatzierten Bewerber. Oberburg (1997).

[9] Prognos AG: Energieperspektiven der Szenarien I bis III 1990 bis 2030 – Synthesebericht. Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Fragen, Bundesamt für Energiewirtschaft Bern, (1996).

[10] Wüest & Partner: Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudeparks 1990 – 2030. Arbeitsbericht, Zürich (1994).

[11] *M. Jakob*: Auswertung von Gebäudedatenbanken zwecks Bestimmung der Grössen von Gebäuden und existierenden Nahwärmeverbunden. Interne Arbeitsdokumentation, PSI, Villigen (1999).

[12] *W. Baumgartner*: Energetische Grundlagen zur Ermittlung der WKK-Potenziale in der Industrie. Positionspapier zu Handen des PSI, BASICS, Zürich, (1998).

[13] *U. Gantner* und *S. Hirschberg*: Entwicklung der Nutzung regenerativer Energiequellen in der Schweiz. Beitrag zum Schlussbericht der SATW-Arbeitsgruppe «CH 50 % – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien» (1999).

[14] Dr. Eicher + Pauli, IWK und weitere: Abklärungen und WKK-Studien auf Betriebsniveau von verschiedenen Industriebetrieben in den Branchen Chemie, Papier, Nahrungsmittel, Zement, Ziegelei.

[15] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 1995 – The Science of Climate Change – Summary for Policy Makers. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1996).

Perspectives de l'approvisionnement en électricité et en chaleur pour la Suisse

L'approvisionnement futur idéal se présente comme suit: neutre du point de vue écologique, avantageux, protégé contre tout risque économique, indépendant de l'étranger et enfin exempt de tout goulet d'étranglement et risque d'accident grave. Même s'il faut s'attendre à certaines améliorations écologiques et économiques remarquables des divers systèmes d'approvisionnement, la prochaine génération des installations de mise à disposition d'énergie – en conséquence, le futur parc des installations – ne pourra pas encore remplir toutes ces conditions. Selon des études réalisées par l'Institut Paul Scherrer (IPS), en collaboration avec l'Association des entreprises électriques suisses (AES), cela est dû d'une part au potentiel de sources d'énergies renouvelables qui, à moyen terme, ne peut être exploité que de façon limitée et d'autre part, aux principaux agents énergétiques, principalement non renouvelables, encore utilisés pour la production d'énergie.