

Oktober 2003

Technologie-Monitoring

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Dr.EICHER+PAULI AG, Kasernenstrasse 21, 4410 Liestal in Zusammenarbeit mit
Econcept AG, Lavaterstrasse 66, 8002 Zürich

Autoren:

Dr. Hanspeter Eicher, Dr.EICHER+PAULI AG
Walter Ott, Econcept AG
Reto Rigassi, Dr.EICHER+PAULI AG

Begleitgruppe:

Ruedi Meier, Programm energiewirtschaftliche Grundlagen
Michael Bhend, Bundesamt für Energie BFE
Hansueli Schärer, Bundesamt für Energie BFE
Bruno Bebié, Industrielle Betriebe der Stadt Zürich
Thomas Fisch, Amt für Umwelt und Energie BS
Eberhard Jochem, Eidgenössische Technische Hochschule ETH

Impressum

Projektnummer: 01.1.019
Verfasser: Reto Rigassi
Telefon: 061 921 99 91
E-Mail: reto.rigassi@eicher-pauli.ch
Mitautoren: Walter Ott, Econcept
Freigabe: Hanspeter Eicher

Dokumentation

Stand: Fassung vom 28.10.2003 3:13

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist allein der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern · www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
Bestellnummer 805.961 d / 10.03 / 100

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Résumé	12
1 Aufgabenstellung und Berichtsaufbau	19
1.1 Aufgabenstellung	19
1.2 Berichtsaufbau	19
2 Methodik	21
2.1 Technologiefelder	21
2.2 Energiegestehungskosten	28
3 Motorische Wärmekraftkopplung	36
3.1 Marktsituation	36
3.2 Berechnungsmodell	37
3.3 Bisherige Entwicklung.....	40
3.4 Künftige Entwicklung	47
3.5 Fazit	51
4 Brennstoffzellen	52
4.1 Marktsituation	52
4.2 Berechnungsmodell	54
4.3 Aktueller Stand.....	54
4.4 Künftige Entwicklung	56
4.5 Fazit	59
5 Wärmepumpen	61
5.1 Marktsituation	61
5.2 Berechnungsmodell	61
5.3 Bisherige Entwicklung.....	65
5.4 Künftige Entwicklung	70
5.5 Fazit	72
6 Hochleistungswärmedämmung	73
6.1 Marktsituation	73
6.2 Berechnungsmodell	73
6.3 Aktueller Stand.....	76
6.4 Künftige Entwicklung	79
6.5 Fazit	82
7 Fazit / Empfehlungen	83
7.1 Fazit	83
7.2 Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	85
8 Literaturverzeichnis	86

Anhang	87
A1 Berechnungsmodell WKK	87
A2 Berechnungsmodell Wärmepumpen	88
A3 Berechnungsmodell Hochleistungswärmedämmung.....	89

Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Für den Durchbruch von neuen, effizienteren Energietechnologien ist deren Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung. Dabei sind aber die notwendigen Grundlagen für die Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht nicht oder nur sehr ungenügend vorhanden. Es ist beispielsweise weitgehend unklar, welche Technologien sich zu welchen Kosten in den letzten zehn Jahren im Rahmen von Energie 2000 entwickelt haben. Die künftigen Entwicklungspfade von Energieeffizienztechnologien bzw. erneuerbaren Energien sind noch viel weniger bekannt. Es bleibt damit weitgehend offen, auf welche Technologien in den kommenden Jahren gesetzt werden sollte, wenn die vorhandenen Mittel möglichst wirksam eingesetzt werden sollen.

Mit einem umfassenden und systematischen Technologie-Monitoring sollen Grundlagen für die Beurteilung der wirtschaftlichen Entwicklung neuer Energietechnologien bereitgestellt werden. Auf dieser Basis sind für ausgewählte Technologien Datenreihen bereitzustellen, welche die bisherige Entwicklung dokumentieren und zukünftige Entwicklungen zu ermitteln versuchen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden exemplarisch motorische Wärmekraftkopplungsanlagen (100 und 400 kW_{el}), Brennstoffzellenheizgeräte für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Luft-/Wasserwärmepumpen für neue Einfamilienhäuser sowie die Hochleistungswärmedämmung untersucht.

Motorische Wärmekraftkopplung

Die motorische Wärmekraftkopplung wurde in den Bereichen von 100 und 400 kW elektrischer Leistung mit den Energieträgern Erdgas und Diesel (resp. Heizöl) untersucht. Anhand der erhobenen Daten für BHKW-Modulkosten, elektrischem Nutzungsgrad und Wartungskosten sowie zusätzlichen Erfahrungswerten wurde der Verlauf der Stromgestehungskosten in Nichtwohnbauten (Gewerbe, Industrie, o.ä. also ohne Nahwärmenetz) berechnet.

Bisherige Entwicklung

Im Laufe der 90er Jahre sind die Modulkosten real um ca. 60 % gesunken. Stellt man die Modulkosten den Absatzzahlen gegenüber, so ergibt sich ein Kostendegressionsfaktor¹ von 0.61, d.h. bei einer Verdoppelung des kumulierten Absatzes reduzieren sich die Kosten auf 61 % des Ausgangswertes. Diese enorme Reduktion muss vorwiegend auf die Preispolitik der Anbieter (Marktdruck) zurückgeführt werden, deren Auswirkungen durch 'echte' Lerneffekte wie Kompaktbauweise und Magermonte-technologie verstärkt worden sind.

Deutliche Fortschritte konnten in den neunziger Jahren auch bei den Wartungskosten (ca. -30 %) und dem elektrischen Nutzungsgrad (ca. +10 %) erzielt werden.

Durch die erwähnten Fortschritte sind die Stromgestehungskosten zwischen 1990 und 2000 drastisch gesunken (ca. 40 %) und liegen seit Mitte der neunziger Jahre unter den Bezugskosten für Elektrizität. Die Statistik zeigt, dass sich dies bis etwa ins Jahr 2000 (Baumentscheide bis ca. 1998) unmittelbar auf die quantitative Entwicklung der Wärmekraftkopplung ausgewirkt hat. Anschliessend konnte die an und für sich gute Marktposition infolge der unklar gewordenen Zukunftsaussichten (Liberalisierung des Strommarktes) nicht mehr genutzt werden und der Absatz ist entsprechend rückläufig.

¹ Der Kostendegressionsfaktor gibt an, wie sich die Kosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion eines Produktes verändern. Er ist somit ein Mass für die erzielten Lern- und Skaleneffekte. Die im Rahmen der Arbeit ermittelten Kostendegressionsfaktoren beziehen sich auf den Schweizer Markt.

Zukünftige Entwicklung

Bis 2010 dürfte die Entwicklung beim elektrischen Nutzungsgrad und den Wartungskosten in ähnlichem Tempo wie bisher weitergehen, während die Modulkosten deutlich langsamer sinken werden, da die Margen in der Schweiz kaum weiter reduzierbar sind.

Unter Annahme von konstanten Energiepreisen ist eine weitere Reduktion der realen Stromgestehungskosten von 5 bis max. 20 % zu erwarten.

Der tatsächliche Verlauf und damit auch allfällige Auswirkungen auf den WKK-Markt werden allerdings stark abhängig bleiben von der Entwicklung der Brennstoffpreise und der Entwicklung des Elektrizitätsmarktes.

Ermittelte Werte

	1990	1995	2000	2010
WKK motorisch 100 kW_{el}				
Modulkosten [Fr.]	4'000	2'750	1'600	1'300 - 1'500
Nutzungsgrad el. [%]				
- Erdgas	30	31.5	33	35 - 37
- Diesel	-	-	38	40 - 42
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]				
- Erdgas	5.5	4.5	3.5	2.5 - 3.0
- Diesel	-	-	4.2	3.2 - 3.7
Stromgestehungskosten ¹⁾	21	16	12	9 - 11
WKK motorisch 400 kW_{el}				
Modulkosten [Fr.]	2'500 - 3'000	1'800	1'100	900 - 1'000
Nutzungsgrad el. [%]				
- Erdgas	32	34	36	39 - 41
- Diesel	-	-	39	41 - 43
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]				
- Erdgas	-	4.25	3.0	2.0 - 2.5
- Diesel	-	-	3.7	2.7 - 3.2
Stromgestehungskosten ¹⁾	16	13	10	8 - 9

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für die im entsprechenden Kapitel beschriebenen Rahmenbedingungen (Zinssatz, Vollbetriebsstunden, etc.).

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 1 Ermittelte Werte für motorische WKK-Anlagen mit 100/400 kW_{el}

Brennstoffzellen

Die Brennstoffzellentechnologie wurde für WKK-Module für Ein- bis Mehrfamilienhäuser oder kleinere Gewerbeliegenschaften mit einer elektrischen Leistung unter 10 kW untersucht (sogenannte Brennstoffzellenheizgeräte). Diese Anlagen dringen in einen Bereich vor, in welchem motorische WKK-Anlagen bisher praktisch nicht Fuss fassen konnten.

Brennstoffzellenheizgeräte werden erst im Rahmen von Vorserien eingesetzt und sind noch nicht kommerziell verfügbar. Bezüglich der Kosten und der technischen Daten sind folglich nur sehr beschränkt verlässliche Angaben zu erhalten. Ein detailliertes Technologie-Monitoring ist unter diesen Umständen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Es wurde deshalb versucht, den Entwicklungsstand und die Ziele von zwei Systementwicklern möglichst genau zu erfassen und kritisch zu hinterfragen. Damit soll ein erster Grundstein gelegt werden, um die Entwicklung und die damit verbundenen Lernprozesse zu verfolgen. Sobald die Brennstoffzellengeräte kommerziell angeboten werden (nach bisherigem Stand ab 2004/05) kann mit einem umfassenden Monitoring begonnen werden.

Aktueller Stand

Eigentliche Preise existieren heute gar nicht. Die Erwerber der Vorseriengeräte (bisher ausschliesslich Energieversorgungsunternehmen) bezahlen einen Teil der Entwicklungskosten und erwerben sich dadurch die Möglichkeit einer engen Zusammenarbeit mit dem Lieferanten und eine gute Startposition für eine Marktausweitung in einem neuen Markt.

Für die Investitions- und die Wartungskosten sind deshalb erst grobe Schätzungen möglich. Beide liegen - wie dies beim aktuellen Entwicklungsstand und den entsprechend geringen Stückzahlen zu erwarten ist - noch weit über dem Mass, welches für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendig wäre.

Vor allem kleine Anlagen müssen mit einem Wartungsintervall von mindestens einem Jahr auskommen, da sonst die spezifischen Wartungskosten auch längerfristig viel zu hoch liegen werden.

Die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade im längerfristigen Betrieb sind noch wenig bekannt. Sie liegen zum Teil aber noch deutlich tiefer als diejenigen von motorischen Anlagen.

Zukünftige Entwicklung

Betreffend der künftigen Entwicklung bestehen noch grosse Unsicherheiten. Trotzdem kann gezeigt werden, dass die für die wirtschaftliche Entwicklung massgebenden Kostenziele der Systementwickler von Fr. 3'000.--/kW erreicht werden, wenn bis zur Aufnahme der Serienproduktion ein Kostendegressionsfaktor² von 0.75 erzielt wird. Aufgrund der Erfahrungen vergleichbarer Technologien erscheint ein derartiger Kostendegressionsfaktor zwar ambitiös, aber durchaus erreichbar.

Werden die erwähnten Kostenziele erreicht und kann die Lebensdauer der Zellstapel um den Faktor 10 erhöht werden, so sind die wirtschaftlichen Aussichten für Brennstoffzellenheizgeräte erfolgsversprechend.

² Der Kostendegressionsfaktor gibt an, wie sich die Kosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion eines Produktes verändern. Er ist somit ein Mass für die erzielten Lern- und Skaleneffekte. Ein Kostendegressionsfaktor von 0.75 bedeutet, dass sich die Kosten jeweils nach einer Verdoppelung der kumulierten Produktion auf 75 % des Ausgangswertes reduzieren.

Ermittelte Werte

	1990	1995	2000	2010
WKK Brennstoffzellenheizgeräte				
Mehrkosten BZ-Heizgeräte [Fr./kW]	-	-	40'000 - 100'000	2'000 - 4'000
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]	-	-	> 100	1.5 - 4.5
Nutzungsgrad el. [%]	-	-		
- PEM			20 - 30	30 - 35
- SOFC			20 - 30	35 - 40
Nutzungsgrad th. [%]	-	-		
- PEM			30 - 40	45 - 50
- SOFC			40 - 50	45 - 50
Stromgestehungskosten ¹⁾	-	-	-	15 - 26

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für die im entsprechenden Kapitel beschriebenen Rahmenbedingungen (Zinssatz, Vollbetriebsstunden, etc.).

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 2 Ermittelte Werte für Brennstoffzellenheizgeräte < 10 kW_{el}

Wärmepumpen

Die Entwicklung der Wärmepumpen wurde anhand von Luft-Wasserwärmepumpen untersucht. Anhand der erhobenen Daten für die Aggregatskosten und der Jahresarbeitszahl sowie zusätzlichen Erfahrungswerten wurde der Verlauf der Wärmegestehungskosten in neuen Einfamilienhäusern berechnet.

Bisherige Entwicklung

Im Laufe der 90er Jahre sind die Aggregatskosten real um ca. 35 % gesunken. Stellt man die Aggregatskosten den Absatzzahlen gegenüber, so ergibt sich ein Kostendegressionsfaktor von 0.77, d.h. bei einer Verdoppelung des kumulierten Absatzes reduzieren sich die Kosten auf 77 % des Ausgangswertes. Es wird davon ausgegangen, dass diese Reduktion vor allem auf Skaleneffekte (steigender Absatz bei gleichzeitig sinkender Anzahl Hersteller) und den vorhandenen Preiskampf zurückzuführen ist.

Gleichzeitig verbesserte sich die Jahresarbeitszahl der untersuchten Anlagen von 1992 bis 1998 um etwa 20 %, was vor allem auf eine optimierte Auslegung der Hauptkomponenten (Wärmetauscher, Kompressor) und den Einsatz von effizienteren Kompressoren zurückgeführt werden kann.

Es scheint augenfällig, dass die Wärmepumpen-Förderung des Bundes einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Aggregatskosten und der Jahresarbeitszahlen geübt hat. Das Wärmepumpen-Testzentrum in Töss und die Einführung des Gütesiegels verschärfen durch die verbesserte Markttransparenz den Wettbewerb unter den Herstellern. Der Aufwand für das Erlangen eines Gütesiegels ist bei kleinen Stückzahlen kaum zu rechtfertigen und hat mit dazu beigetragen, dass sich die Anzahl der Wärmepumpen-Hersteller in der Schweiz in den letzten 10 Jahren deutlich reduziert hat. Grosse Stückzahlen erlauben den Herstellern nicht nur eine umfassendere Entwicklung und den Betrieb eines dichtes Servicenetzes, sondern ermöglichen auch den Einsatz von rationelleren Produktionsmethoden.

Vor allem die Entwicklung der Aggregatskosten war ausschlaggebend für die Reduktion der Wärmegestehungskosten von 20 - 25 %, welche dazu geführt hat, dass Luft-Wasser-Wärmepumpen für neue Einfamilienhäuser heute konkurrenzfähig sind. Ein Blick auf die Statistik zeigt einen beeindruckenden Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher und quantitativer Entwicklung.

Zukünftige Entwicklung

Für die kommenden 10 Jahre wird erwartet, dass die Aggregatskosten und Jahresarbeitszahl sich maximal mit annähernd gleichem Tempo wie in den vergangenen 10 Jahren entwickeln. Eine weitere Reduktion der Wärmegestehungskosten von 10 bis 20 % scheint bei konstanten Strompreisen als wahrscheinlich. Vorausgesetzt die Strompreise steigen bis 2010 nicht, werden die Wärmegestehungskosten für L/W-Wärmepumpen bis 2010 auch dann günstiger bleiben wie diejenigen einer Ölheizung, wenn die Ölpreise wieder auf das Tiefpreisniveau von Mitte der neunziger Jahre sinken.

Ermittelte Werte

	1990	1995	2000	2010
Luft-/Wasserwärmepumpe EFH-Neubau				
Gerätekosten [Fr.]	2'400	2'200	1'700	1200 - 1'500
Jahresarbeitszahl	2.6	2.8	3.0	3.2 - 3.5
Wärmegestehungskosten ¹⁾	20	19	16	13 - 15

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für die im entsprechenden Kapitel beschriebenen Rahmenbedingungen (Zinssatz, Vollbetriebsstunden, etc.).

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 3 Ermittelte Werte für L/W-Wärmepumpen im Bereich Einfamilienhaus Neubau

Hochleistungswärmedämmung

Die Entwicklung der Hochleistungswärmedämmung im Baubereich für eine Innendämmung eines Altbaus wurde untersucht. Ermittelt wurden Daten betreffend der Kosten der Vakuumdämmplatten, der zusätzlich notwendige Material- und Arbeitskosten (Systemkosten) und des Dämmwerts der Vakuumdämmplatten.

Aktueller Stand

Bei der Innenwärmedämmung eines Altbaus kann mit einem HLWD-System bei geringerem Platzbedarf eine grössere Dämmwirkung erzielt werden.

Die aktuellen Kosten der Vakuumdämmplatten betragen Fr. 75.--/m². Im Neuzustand beträgt der U-Wert der Dämmplatten 0.004 W/m²K. Über eine Lebensdauer von 50 Jahren wird mit einem U-Wert von 0.008 W/m²K gerechnet. Einige Unsicherheit besteht noch, wie sich die äusseren Bedingungen, welche im Baubereich bezüglich Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen vorhanden sind, auf das Alterungsverhalten von Vakuumdämmplatten auswirken.

Die zusätzlich notwendigen Material- und Arbeitskosten (Systemkosten) betragen beim untersuchten Fallbeispiel Fr. 125 bis Fr. 145.--/m², wobei ca. ein Viertel dadurch bedingt ist, dass für die noch wenig bekannte Technologie für Beratung, Begleitung bei der Montage und Risiko (für beschädigte Platten) ein erhöhter Aufwand nötig ist.

Heute liegen die Kosten der eingesparten Wärme bei einer Innendämmung mit Vakuumdämmplatten durch die höheren Investitionskosten deutlich höher wie bei der Verwendung von herkömmlichen Dämmmaterialien. Wird der Nutzflächenverlust entsprechend mit einem Ansatz von Fr. 15.-- pro Quadratmeter und Monat (entsprechend üblicher Mietzinsen) bewertet, so bleibt im untersuchten Fallbeispiel nur eine sehr geringe Differenz.

Zukünftige Entwicklung

Sowohl die Kosten der Vakuumdämmplatten wie auch die zusätzlich notwendigen Kosten für ein gesamtes Dämmsystem können bei steigendem Marktvolumen bis 2010 noch deutlich gesenkt werden.

Die Kosten für die Vakuumdämmplatten können durch eine automatisierte Produktion bis 2010 halbiert werden. Wenn sich die Hochleistungswärmedämmung bei Architekten, Bauherren und ausführenden Firmen etabliert, können die Systemkosten auf Fr. 90 bis Fr. 110.--/m² reduziert werden.

Für die untersuchte Innendämmung eines Altbaus zeigt sich, dass die Kosten der eingesparten Wärme für die Hochleistungswärmedämmung bis 2010 um rund 25 - 40 % reduziert werden können. Dadurch wird die Hochleistungswärmedämmung für eine Innendämmung gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wirtschaftlich konkurrenzfähig. Unter der Annahme von konstanten Heizölpreisen bleiben die Kosten jedoch noch deutlich über dem Niveau der variablen Kosten einer Ölheizung.

Ermittelte Werte

	1990	1995	2000	2010
Hochleistungs-Wärmedämmung				
Kosten Dämmplatten [Fr./m ²]	-	-	75	30 - 45
Kosten System [Fr./m ²]	-	-	125 - 145	90 - 110
U-Wert [W/mK]	-	-	0.008	0.005 - 0.006
Gestehungskosten eingesparte Wärme [Rp./kWh]	-	-	21 - 23	13 - 16

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für jeweils spezifische Rahmenbedingungen.

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 4 **Ermittelte Werte Hochleistungswärmedämmung für die Innendämmung eines Altbaus**

Résumé

Définition des tâches

Pour que de nouvelles technologies énergétiques plus efficaces puissent s'imposer, il importe qu'elles soient rentables. Toutefois, les bases nécessaires à l'évaluation technologique sous l'angle économique n'existent pas ou sont très insuffisantes. Ainsi, par exemple, il est difficile de savoir quelles technologies ont évolué - et combien elles ont coûté - ces dix dernières années dans le cadre du programme Energie 2000. Les voies futures du développement des technologies promouvant l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont encore trop méconnues. Par conséquent, on ne sait pas encore sur quelles technologies s'appuyer ces prochaines années si l'on veut utiliser les moyens disponibles aussi efficacement que possible.

Une veille technologique étendue et systématique livrera les bases d'évaluation du développement économique des nouvelles technologies énergétiques. A partir de là, il convient de fournir pour les technologies choisies les données qui tentent de montrer quelle a été l'évolution jusqu'à présent et de déterminer quel sera l'avenir.

Dans le cadre du présent travail, des installations de cogénération avec moteur (100 et 400 kW_{el}), des appareils de chauffage à pile à combustible pour les maisons individuelles et locatives, des pompes à chaleur air-eau pour de nouvelles maisons individuelles ainsi que les isolations thermiques à haut rendement sont examinés à titre d'exemple.

Cogénération avec moteur

La cogénération (couplage chaleur-force, CCF) avec moteur a été examinée dans les plages de 100 et 400 kW de puissance électrique avec des agents énergétiques tels que le gaz naturel et le diesel (ou le mazout). Les coûts du module pour les centrales de chauffage à distance, le taux d'utilisation de l'énergie électrique, les coûts de maintenance et des valeurs empiriques supplémentaires ont permis de calculer l'évolution du prix de revient du courant dans les bâtiments inhabités (PME, industrie, etc., donc sans réseau de chauffage collectif).

Evolution à ce jour

Au cours des années nonante, les coûts réels du module ont baissé d'environ 60%. La comparaison des coûts du module avec les chiffres de vente donne un facteur de diminution des coûts³ de 0,61: en cas de doublement des ventes cumulées, les coûts se réduisent à 61% de la valeur initiale. Cette énorme réduction est imputable essentiellement à la politique des prix des fournisseurs (pression du marché), dont les impacts ont été renforcés par de «réels» effets didactiques tels que la construction compacte et la technologie des moteurs à mélange pauvre.

Au cours des années nonante, de nets progrès ont pu être réalisés également en ce qui concerne les coûts de maintenance (qui ont baissé d'environ 30%) et le rendement électrique (qui a augmenté d'environ 10 %).

Les progrès mentionnés ont entraîné une forte baisse des prix entre 1990 et 2000 (env. 40%), inférieurs depuis le milieu des années nonante aux coûts d'achat de l'électricité. La statistique montre que ce fait a eu un impact direct sur l'évolution quantitative de la cogénération jusqu'en 2000 (décisions

³ Le facteur de diminution des coûts indique comment ceux-ci changent en cas de doublement de la production cumulée d'un produit. Il mesure ainsi les effets didactiques et d'échelle obtenus. Les facteurs de diminution des coûts calculés se réfèrent au marché suisse.

en matière de construction jusqu'en 1998). Par la suite, les incertitudes pesant sur les perspectives d'avenir n'ont plus permis de tirer profit d'une position sur le marché en soi favorable (libéralisation du marché de l'électricité) et ont entraîné un recul des ventes.

Evolution future

D'ici 2010, l'évolution du rendement électrique et des coûts de maintenance pourrait suivre la cadence qu'elle a connue jusqu'à présent; en revanche, les coûts du module baisseront nettement plus lentement, les marges ne pouvant plus être réduites en Suisse.

Si le prix de l'énergie demeure constant, il faut s'attendre à une réduction supplémentaire du prix de revient réel du courant de 5 à 20 % au plus.

Toutefois, l'évolution effective et, donc, les répercussions éventuelles sur le marché CCF dépendront fortement de l'évolution des prix du combustible et de celle du marché de l'électricité.

Valeurs calculées

	1990	1995	2000	2010
CCF avec moteur 100 kW_{el}				
Coûts du module [Fr.]	4'000	2'750	1'600	1'300 - 1'500
Rendement él. [%]				
- Gaz naturel	30	31.5	33	35 - 37
- Diesel	-	-	38	40 - 42
Coûts de maintenance [ct./kWh _{el}]				
- Gaz naturel	5.5	4.5	3.5	2.5 - 3.0
- Diesel	-	-	4.2	3.2 - 3.7
Prix de revient du courant ¹⁾	21	16	12	9 - 11
Nombre d'installations nouvelles (75 - 150 kW _{el})				
CCF avec moteur 400 kW_{el}				
Coûts du module [Fr.]	2'500 - 3'000	1'800	1'100	900 - 1'000
Rendement él. [%]				
- Gaz naturel	32	34	36	39 - 41
- Diesel	-	-	39	41 - 43
Coûts de maintenance [ct./kWh _{el}]				
- Gaz naturel	-	4.25	3.0	2.0 - 2.5
- Diesel	-	-	3.7	2.7 - 3.2
Prix de revient du courant ¹⁾	16	13	10	8 - 9
Nombre d'installations nouvelles (75 - 150 kW _{el})				

1) Les prix de revient du courant et de la chaleur indiqués servent à présenter les impacts des facteurs technico-économiques sur la compétitivité économique. Ils sont valables uniquement pour les conditions cadres décrites dans le chapitre correspondant (taux d'intérêt, heures de pleine exploitation, etc.).

Table 5 Valeurs calculées pour les cogénérations avec moteur d'une puissance de 100/400 kW_{el}

Piles à combustible

La technologie des piles à combustible a été examinée pour des modules CCF destinés à des maisons individuelles ou locatives ou de petits immeubles industriels d'une puissance inférieure à 10 kW (appareils de chauffage à piles à combustible). Ces installations touchent un secteur où, jusqu'à présent, les installations CCF avec moteur n'ont pratiquement pas pu pénétrer.

Les appareils de chauffage à piles à combustible ne sont utilisés que dans le cadre de préséries et ne sont pas encore commercialisés. Par conséquent, en ce qui concerne les coûts et les données techniques, on n'obtiendra que des indications peu fiables. Une veille technologique détaillée se révélant encore impossible pour le moment, on a tenté d'évaluer et d'analyser avec un regard critique le niveau de développement et les objectifs de deux concepteurs. On posera ainsi la première pierre qui permettra de suivre l'évolution et les processus didactiques qui s'y rattachent. Dès que les appareils de chauffage à piles à combustible seront commercialisés (en l'état actuel de nos connaissances, dès 2004/05), on pourra procéder à une veille élargie.

Etat actuel

Il n'y pas actuellement de prix proprement dits. Les acquéreurs des appareils de présérie (jusqu'à présent, exclusivement les entreprises d'approvisionnement énergétique) paient une part des coûts de développement, obtenant ainsi la possibilité de collaborer étroitement avec le fournisseur et une position initiale favorable pour conquérir un nouveau marché.

Par conséquent, les coûts d'investissement et de maintenance ne peuvent donner lieu qu'à des estimations sommaires. Tous deux - comme le laissent supposer le niveau de développement actuel et le petit nombre de pièces - dépassent encore largement les dimensions nécessaires à une exploitation commerciale.

Les coûts de maintenance spécifiques étant encore nettement trop élevés à long terme, les petites installations doivent avoir un intervalle d'au moins une année entre deux maintenances.

Les rendements électrique et thermique lors d'une exploitation à long terme sont encore peu connus. Toutefois, ils sont généralement nettement inférieurs à ceux des installations avec moteur.

Evolution future

Bien que de lourdes incertitudes pèsent sur l'avenir, il apparaît que l'objectif de 3000 fr./kW, déterminant pour le développement économique, des concepteurs de systèmes sera atteint si l'on obtient un facteur de diminution des coûts⁴ de 0,75. Compte tenu des expériences faites avec des technologies comparables, cela semble possible, quoique ambitieux.

Si cet objectif est atteint et que la durée de vie de la pile peut être augmentée du facteur 10, les perspectives économiques des appareils de chauffage à piles à combustible sont prometteuses.

⁴ Le facteur de diminution des coûts indique comment ceux-ci changent en cas de doublement de la production cumulée d'un produit. Il mesure ainsi les effets didactiques et d'échelle obtenus. Un facteur de diminution des coûts de 0,75 signifie que les coûts se réduisent, après un doublement de la production cumulée, à 75 % de la valeur initiale.

Valeurs calculées

	1990	1995	2000	2010
CCF appareils de chauffage à pile à combustible				
Surcoût app. ch.. P. comb. [Fr./kW]	-	-	40'000 - 100'000	2'000 - 4'000
Coûts de maintenance [ct./kWh _{el}]	-	-	> 100	1.5 - 4.5
Rendement él. [%]	-	-		
- PEM			20 - 30	30 - 35
- SOFC			20 - 30	35 - 40
Rendement th. [%]	-	-		
- PEM			30 - 40	45 - 50
- SOFC			40 - 50	45 - 50
Prix de revient du courant ¹⁾	-	-	-	15 - 26
Nombre d'installations nouvelles	-	-	0	-

1) Les prix de revient du courant et de la chaleur indiqués servent à présenter les impacts des facteurs technico-économiques sur la compétitivité économique. Ils sont valables uniquement pour les conditions cadres décrites dans le chapitre correspondant (taux d'intérêt, heures de pleine exploitation, etc.).

Table 6 Valeurs calculées pour les appareils de chauffage à piles combustibles < 10 kW_{el}

Pompes à chaleur

L'évolution des pompes à chaleur a été examinée à l'aide des pompes à chaleur air-eau. Les données recueillies pour les coûts de l'agrégat (machine) et le coefficient de performance annuel ainsi que des valeurs empiriques supplémentaires ont permis de calculer l'évolution du prix de revient de l'énergie thermique dans de nouvelles maisons individuelles.

Evolution à ce jour

Au cours des années nonante, les coûts de l'agrégat ont diminué en valeur réelle d'environ 35 %. Si l'on compare les coûts de l'agrégat avec les chiffres de vente, on obtient un facteur de diminution des coûts de 0,77: en cas de doublement des ventes cumulées, les coûts se réduisent à 77 % de la valeur initiale. Ce qui laisse supposer que cette réduction est due avant tout aux effets d'échelle (accroissement des ventes en cas de diminution conjointe du nombre de fabricants) et à la lutte des prix.

Le coefficient de performance annuel s'est conjointement amélioré de 20% de 1992 à 1998, en raison surtout d'un meilleur aménagement des composants principaux (échangeur de chaleur, compresseur) et du recours à des compresseurs plus efficaces.

Il paraît évident que la promotion des pompes à chaleur par la Confédération a exercé une influence décisive sur l'évolution des coûts de l'agrégat et des coefficients de performance annuels. Le centre de test des pompes à chaleur de Töss et l'introduction du label de qualité renforcent, en raison d'une transparence accrue du marché, la concurrence entre les fabricants. Pour les petits nombres de pièces, les dépenses que nécessite l'obtention du label de qualité ne se justifient guère et ont contribué à réduire nettement, ces dix dernières années, le nombre de fabricants de pompes à chaleur en Suisse. Un nombre important de pièces permet aux fabricants non seulement de s'agrandir et d'exploiter un réseau plus dense, mais également de recourir à des méthodes de production plus rationnelles.

L'évolution des coûts de l'agrégat surtout a eu un impact décisif sur la réduction de 20 à 25% des coûts des pompes à chaleur, ce qui rend actuellement les pompes à chaleur air-eau compétitives pour de nouvelles maisons individuelles. Un coup d'oeil sur la statistique montre l'existence d'un lien notable entre l'évolution économique et l'évolution quantitative.

Evolution future

Pour les dix prochaines années, on s'attend à ce que les coûts de l'agrégat et le coefficient de performance annuel évoluent au plus au même rythme que ces dix dernières années. Avec des prix du courant constants, une réduction supplémentaire de 10 à 20 % du prix de revient de l'énergie thermique paraît plausible. Si le prix de revient n'augmente pas d'ici 2010, le prix de revient des pompes à chaleur air-eau restera d'ici là plus avantageux que celui des chauffages à mazout, pour autant que le prix du pétrole baisse à nouveau au niveau du milieu des années nonante.

Valeurs calculées

	1990	1995	2000	2010
Pompes à chaleur air-eau pour constr. nouv. maisons individuelles				
Coûts des appareils [Fr.]	2'400	2'200	1'700	1200 - 1'500
Coefficient de performance annuel	2.6	2.8	3.0	3.2 - 3.5
Prix de revient de la chaleur ¹⁾	20	19	16	13 - 15
Nombre d'installations nouvelles				

1) Les prix de revient du courant et de la chaleur indiqués servent à présenter les impacts des facteurs technico-économiques sur la compétitivité économique. Ils sont valables uniquement pour les conditions cadres décrites dans le chapitre correspondant (taux d'intérêt, heures de pleine exploitation, etc.).

Table 7 Valeurs calculées pour les pompes à chaleur air-eau dans le domaine de la construction de maisons individuelles

Isolation thermique à haut rendement

Le développement de l'isolation thermique à haut rendement a été examiné dans le domaine de la construction en rapport avec l'isolation interne d'un vieux bâtiment. Les données concernant les coûts des panneaux d'isolation sous vide, les coûts du matériel et du travail supplémentaires nécessaires (coûts du système) et la valeur d'isolation de ces panneaux ont été établies.

Etat actuel

En ce qui concerne l'isolation thermique intérieure d'un ancien bâtiment, un système d'isolation thermique à haut rendement permet d'atteindre un assez grand impact d'isolation avec un moindre besoin de place.

Les coûts actuels des panneaux d'isolation sous vide se montent à 75.-fr./m². A l'état neuf, la valeur U des panneaux d'isolation s'élève à 0,004 W/m²K. Sur une durée de vie de 50 ans, on compte sur une valeur U de 0,008 W/m²K. Une certaine incertitude existe encore en ce qui concerne les impacts qu'ont sur le vieillissement les conditions extérieures propres aux bâtiments (humidité et variations de température).

Pour le cas examiné, les coûts du matériel et du travail supplémentaires (coûts du système) sont compris entre 125 et 145.- fr./m², un quart provenant du fait que des dépenses accrues relatives à la technologie encore peu connue sont nécessaires pour le conseil, le suivi lors du montage et les risques (pour les panneaux endommagés).

Actuellement, en raison des coûts d'investissement plus élevés, les coûts de l'énergie thermique éparignée pour une isolation intérieure avec panneaux d'isolation sous vide sont nettement supérieurs à ceux qui s'appliquent à l'utilisation de matériel isolant traditionnel. Si la perte de surface utile est calculée en conséquence avec un taux de 15.- francs par mètre carré et par mois (selon les loyers usuels), il ne reste qu'une différence minime dans le cas examiné.

Evolution future

Tant les coûts des plaques isolantes sous vide que les coûts supplémentaires nécessaires à un système isolant global pourront encore sensiblement diminuer si le volume du marché s'accroît d'ici 2010.

Une production automatisée permettra de diviser par deux, d'ici 2010, les coûts des panneaux d'isolation sous vide. Si l'isolation thermique à haut rendement s'impose auprès des architectes, des maîtres d'ouvrage et des entreprises chargées de l'exécution, les coûts du système pourront être réduits à un montant compris entre 90 et 110.- fr./m².

L'examen de l'isolation intérieure d'un ancien bâtiment montre que les coûts de la chaleur éparignée pour l'isolation thermique à haut rendement peuvent être réduits, d'ici 2010, de 25 à 40 % environ. Ce qui rend l'isolation thermique à haut rendement compétitive pour une isolation intérieure par rapport au matériel isolant traditionnel. A condition toutefois que le prix du pétrole reste constant et soit nettement supérieur au niveau des coûts variables d'un chauffage au mazout.

Valeurs calculées

	1990	1995	2000	2010
Isolation thermique à haut rendement				
Coûts panneaux d'isolation [Fr./m ²]	-	-	75	30 - 45
Coûts système [Fr./m ²]	-	-	125 - 145	90 - 110
Valeur U [W/mK]	-	-	0.008	0.005 - 0.006
Prix de revient chaleur économisée [ct./kWh]	-	-	21 - 23	13 - 16

1) Les prix de revient du courant et de la chaleur indiqués servent à présenter les impacts des facteurs technico-économiques sur la compétitivité économique. Ils sont valables uniquement pour les conditions cadres décrites dans le chapitre correspondant (taux d'intérêt, heures de pleine exploitation, etc.).

Table 8 Valeurs calculées de l'isolation thermique à haut rendement pour l'isolation intérieure d'un ancien bâtiment

1 Aufgabenstellung und Berichtsaufbau

1.1 Aufgabenstellung

Ausgangslage

Für den Durchbruch von neuen, effizienteren Energietechnologien ist deren Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung, wobei neben Kapital- und Betriebskosten auch der direkte Nutzen zu beachten ist. Dabei sind aber die notwendigen Grundlagen für die Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht nicht oder nur sehr ungenügend vorhanden. Bereits für die ex-post Entwicklung können keine fundierten Angaben gemacht werden. Es ist beispielsweise weitgehend unklar, welche Technologien sich zu welchen Kosten in den letzten zehn Jahren im Rahmen von Energie 2000 entwickelt haben. Insbesondere ist auch unklar, welche Ursachen zu welchen Kosten- bzw. Preisentwicklungen geführt haben (z.B. neue Produktions- und/oder Verfahrenstechnologien, steigende Produktionseinheiten bzw. Realisierung von Skalenerträgen, etc.).

Die künftigen Entwicklungspfade von Energieeffizienztechnologien bzw. erneuerbaren Energien sind noch viel weniger bekannt. Es bleibt damit weitgehend offen, auf welche Technologien in den kommenden Jahren gesetzt werden sollte, wenn die vorhandenen Mittel möglichst wirksam eingesetzt werden sollen. Es drängt sich auf, ein umfassendes und systematisches Technologie-Monitoring zu etablieren. Gleichzeitig sollen damit die Grundlagen für ein Benchmarking verschiedener Technologien geschaffen werden. Die Entscheidungsträger erhalten damit ein zusätzliches Kriterium für den Einsatz finanzieller Mittel zur Technologieförderung.

Zielsetzungen

Es sollen Grundlagen für die Beurteilung der wirtschaftlichen Entwicklung neuer Energietechnologien bereitgestellt werden. Auf dieser Basis sind für ausgewählte Technologien Datenreihen bereitzustellen, welche die bisherige Entwicklung dokumentieren, und zukünftige Entwicklungen zu ermitteln versuchen. Damit sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Der öffentlichen Hand soll ein zusätzliches Instrument in die Hand gegeben werden, um die knappen Mittel möglichst effizient einzusetzen.
- Die ermittelten Daten dienen als verlässliche Basis für zukünftige Studien im Energiebereich. Bei der Erstellung der Energieperspektiven kann auf eine realistische Datenbasis zurückgegriffen werden
- Die statistischen Entwicklungen im Energiebereich werden besser verständlich und interpretierbar.
- Planer erhalten eine verbesserte Kostendaten für die Kostenermittlungen in einem frühen Planungsstadium.

1.2 Berichtsaufbau

Im Kapitel 3 werden die methodischen Grundlagen für das Technologie-Monitoring dokumentiert.

Die begrenzten Mittel für das Technologie-Monitoring erfordern eine Konzentration auf die interessantesten und relevantesten Technologien. Zu diesem Zweck werden in Kap. 3.1 die Kriterien festgelegt, welche bei der Auswahl der zu untersuchenden Technologiefelder bzw. Technologien bestimmend sind.

Die Gestehungskosten der Energie bilden den Ausgangspunkt für die wirtschaftliche Einschätzung der Technologien und für das wirtschaftliche Benchmarking. Im Kapitel 3.2 wird die Methodik zur Ermitt-

lung der Energiegestehungskosten beschrieben. Zusätzlich wird festgehalten, wie bestimmt wird, welche Faktoren bei den ausgewählten Technologien mit einem gezielten Monitoring analysiert werden und für welche Faktoren Erfahrungswerte oder Standardannahmen verwendet werden.

In den Kapiteln 4, 5 und 6 wird das eigentliche Technologie-Monitoring exemplarisch für die motorische Wärmekraftkopplung, Wärmepumpen und Hochleistungswärmedämmung durchgeführt.

Zuerst wird jeweils eine kurze Übersicht über die aktuelle Marktsituation gegeben. Anschliessend wird das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Energiegestehungskosten definiert und die Monitoring-Faktoren bestimmt.

Im Unterkapitel 'Bisherige Entwicklung' wird die Entwicklung der Monitoring-Faktoren in den letzten 10 Jahren und die daraus resultierenden Energiegestehungskosten untersucht. Bei der Hochleistungswärmedämmung wird, da es sich um eine ausgesprochen neue Technologie handelt, der aktuelle Stand festgehalten.

Ausgehend von den Ergebnissen der bisherigen Entwicklung wird anschliessend versucht, die weitere Entwicklung der Monitoring-Faktoren und der Energiegestehungskosten bis 2010 zu prognostizieren (Kapitel 'Künftige Entwicklung').

Abschliessend werden die wichtigsten Ergebnisse für jede Technologie im Rahmen eines Fazits zusammengefasst und bewertet.

Im Kapitel 7 wird ein Gesamtfazit über das bisherige Monitoring mit den exemplarisch ausgewählten Technologien gezogen und Empfehlungen über den sinnvollen Umfang eines systematischen Technologie-Monitorings und die zu berücksichtigenden Benchmarkgrössen gegeben.

2 Methodik

Die begrenzten Mittel für das Technologie-Monitoring erfordern eine Konzentration auf die interessantesten und relevantesten Technologien. Zu diesem Zweck werden in Kap. 3.1 die Kriterien festgelegt, welche bei der Auswahl der zu untersuchenden Technologiefelder bzw. Technologien bestimmend sind. Die Kriterien hängen von den Zielsetzungen ab, die mit dem Technologie-Monitoring verfolgt werden. Im Vordergrund stehen die folgenden Zielsetzungen:

- Identifikation von Technologien, die sich in der Vergangenheit dynamisch entwickelt haben, bzw. bei denen in Zukunft ein hohes Entwicklungspotenzial erwartet wird.
- Analyse der Ursachen der dynamischen Entwicklung sowie der Hemmnisse bei fehlender Dynamik.
- Ableitung von Handlungsrichtlinien für die Technologieförderung, für das Marketing und für den Erlass von Rahmenbedingungen (wie Vorschriften, Bewilligungsverfahren und Vollzug, Abgaben, etc.)

Der Entwicklung der Wirtschaftlichkeit neuer Energietechnologien kommt zentrale Bedeutung zu. In Abschnitt 3.2 werden die Grundsätze zur Ableitung der für Monitoring- und Vergleichszwecke benötigten spezifischen Nutzenergiekosten hergeleitet. Dabei werden zwischen unterschiedlichen "scope's" für die Wirtschaftlichkeitsrechnung unterschieden (betriebswirtschaftliche Rechnung, erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung, Einbezug von Nutzenelementen).

2.1 Technologiefelder

Ausgehend von den oben erwähnten Zielsetzungen des Technologie-Monitorings erfolgt die Auswahl der dem Monitoring unterworfenen Technologien mit Hilfe der folgenden Kriterien (Massnahmen im Verkehrsbereich werden vorläufig nicht betrachtet):

Wachstumsdynamik

Technologien mit hohem Wachstum interessieren für die Analyse der Ursachen, der Voraussetzungen und der Nebenwirkungen des Wachstums.

Dasselbe gilt für Technologien mit einem grossen technischen Entwicklungspotenzial und fehlendem Absatzwachstum. Im Rahmen des Technologie-Monitorings geht es in solchen Fällen primär um die Hemmnisanalyse. Hohes technisches Entwicklungspotenzial bedeutet, dass massgebliche technologische Fortschritte aufgrund von Berechnungen, Labor- bzw. Pilotanwendungen erwartet werden, jedoch noch nicht als wirtschaftlich konkurrenzfähiges Produkt bzw. Anwendung verfügbar sind.

Technisch/wirtschaftliche und energetische Bedeutung

Das technische Anwendungspotenzial heute sowie das mögliche Anwendungspotenzial in Zukunft sind wichtige Relevanzkriterien bei der Technologieauswahl. Um zu realistischen Einschätzungen zu kommen, sind zusätzliche Unterkriterien unerlässlich. Am Wesentlichsten sind:

- Die Energiedienstleistungsnachfrage, die mit der Technologie gedeckt werden kann (maximales Anwendungspotenzial)
- Die künftige Entwicklung der Wirtschaftlichkeit einer Technologie
- Nichtenergetische Zusatznutzen, von energetischen Massnahmen: Diese können für den Investitions/Kaufentscheid u.U. wichtiger sein als der direkte energetische Nutzen. Sie sind jedoch in der Regel nur näherungsweise quantifizierbar und eignen sich schlecht für ein Monitoring.

Nur technisch-wirtschaftlich konkurrenzfähige Potenziale erlauben zweckmässige und brauchbare mittelfristige Aussagen über die potenzielle Bedeutung einer Technologie. Eng mit der künftigen Wirtschaftlichkeitsentwicklung verknüpft ist das Innovationspotenzial. Neben den absatz- bzw. mengenabhängigen Skaleneffekten gehört das Innovationspotenzial zu den massgeblichen Triebkräften, die die Wirtschaftlichkeit und die Marktchancen neuer Technologien bestimmen⁵. Beim technisch-wirtschaftlichen Potenzial sollen daher die folgenden zwei Potenziale mitberücksichtigt werden:

- Kurz- bis mittelfristiges technisch-wirtschaftliches Potenzial: Absehbares Potenzial aufgrund der aktuellen Angebots- und Anwendungsverhältnisse sowie aufgrund der für die kommenden 2 bis 5 Jahre geschätzten technischen und wirtschaftlichen Entwicklung einer Technologie.
- Mittel- bis längerfristiges technisch-wirtschaftliches Potenzial: Potenzial aufgrund der in Zukunft erwarteten Anwendungsbereiche sowie aufgrund der erwarteten Entwicklung der Wirtschaftlichkeitsverhältnisse. Dabei wird angenommen, dass ansatzweise erkannte technologische sowie produktionstechnische und absatzmässige Innovationspotenziale realisiert werden können (Zeithorizont: 5 bis 15 Jahre).

Innovationspotenzial

Das Innovationspotenzial ist eng verknüpft mit dem technisch-wirtschaftlichen Potenzial und ist - wie oben erwähnt - der zentrale Bestimmungsfaktor des langfristigen technisch-wirtschaftlichen Potenzials. Dabei ist zwischen Produktinnovationen, Prozessinnovationen sowie Bedürfnis- und Funktionsinnovationen⁶ zu unterscheiden, die zum Teil in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus innovationsbestimmend sind. Innovationen können zu einer Vergrösserung des Absatzpotenzials führen, indem neuartige technische Möglichkeiten gefunden werden, die Energiedienstleistungsnachfrage zu decken (Produkt- und Funktionsinnovationen). Prozessinnovationen können zu höherer Produktqualität und/oder zu Kostensenkungen führen, die infolge gesteigerter Wirtschaftlichkeit einen höheren Absatz und weitere Kostensenkungen durch Skaleneffekte erlauben. Innovative Vermarktung kann die Absatzmöglichkeiten erweitern, Kostensenkungen im Vertrieb auslösen und dadurch ebenfalls Skaleneffekte ermöglichen. Das Innovationspotenzial ist eine zentrale Grösse für das strategisch ausgerichtete Monitoring. Es hängt von der Position einer Technologie auf der Lebenszykluskurve ab. Langfristig interessant sind vor allem neue, nicht marktübliche Technologien, die in der **Pionierphase** stehen und ein hohes Wachstums- und Erfolgspotenzial aufweisen. Bei Technologien in der **Wachstumsphase** kommt es auf das Potenzial zu Absatzsteigerungen und zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch mengenabhängige Skalenerträge an. In dieser Phase stehen Prozessinnovationen (zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit) sowie Absatz- und Bedürfnisinnovationen (zur schnelleren und umfassenderen Ausschöpfung der Absatzpotenziale und zur Erschliessung neuer Absatzmöglichkeiten) im Vordergrund. Technologien in der **Sättigungsphase** interessieren beim Technologie-Monitoring bestenfalls zu Vergleichszwecken bzw. als Referenzgrösse. Interessant sind Produkteinnovationen, die neue Absatz- und Wachstumsmöglichkeiten eröffnen und damit die Wachstumsphase eines Produktes verlängern⁷.

CO₂- und Klimawirkungen

Beim Technologiebenchmark werden in erster Priorität die energetischen Wirkungen verfolgt und daher Energiespar- und Substitutionstechnologien erfasst. Aufgrund der CO₂-Ziele gemäss CO₂-Gesetz sind Technologien mit einem Reduktionspotenzial bei klimarelevanten Emissionen mitzubersichtigen. Obwohl Elektrizität in der schweizerischen CO₂-Reduktionspolitik zurzeit keine CO₂-

⁵ **Phase im Produktlebenszyklus:** Dieser Aspekt ist mit dem technischen und wirtschaftlichen Entwicklungspotenzial eng verknüpft. Technologien in der sogenannten Pionierphase sind teuer und werden nur von Pioniernachfragern gekauft. Produkte in der Wachstums- oder Sättigungsphase sind für einen Grossteil der Nachfrager wirtschaftlich.

⁶ Vgl. für eine Übersicht über Innovationswirkungen im Energiebereich INFRAS 1998d

⁷ Dabei ist es in der Regel nicht eindeutig, ob vom gleichen aber weiterentwickelten Produkt oder von einem neuen Produkt gesprochen werden soll.

Emissionen zugeschrieben werden, sind aufgrund der energetischen Ziele (und der langfristigen klimapolitischen Ziele) auch Stromspar- und Produktionstechnologien ins Benchmark einzubeziehen.

Portfolioanalyse der Technologiefelder für das Benchmarking

Aufgrund der aktuellen Kosten- und Anwendungsverhältnisse sowie mit Hilfe der in den nächsten 5 bis 8 Jahren erwarteten Entwicklung der Kostenreduktions- und Anwendungspotenziale (= Innovationspotenzial) kann eine erste Portfolioanalyse der Technologiefelder (ohne Verkehr) vorgenommen werden (in Anlehnung an die Arbeiten zu optimalen Förderstrategien bei einer Energieabgabe: **e-concept**/INFRAS 1999 [14], Gantner et al. 2001 [7] und Jakob et al. 2002 [1]). Die Portfolioanalyse umfasst die folgenden Dimensionen:

- **Wirtschaftlichkeit aktuell** (ohne externe Kosten, ohne CO₂-Abgabe): Die angegebenen Kostenbereiche beziehen sich bei der Wärme auf kleine Wärmebezüger (Ein- bis Vier-Familienhäuser) bzw. auf grosse Bezüger und bei Elektrizität auf Nieder- bis Mittelspannungs-Grossbezüger sowie auf Niederspannungs-Kleinbezüger. Als Grundlage zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung weist die folgende Technologietabelle die mittleren Energiegestehungskosten bzw. die Kosten der Energieeinsparung für 2001 und 2010 aus. Die Angaben zu den Kosten im Jahr 2010 stammen aus der Literatur, primär aus [1], [7], [14].
- **Innovationspotenzial**: Preissenkungen/Ausdehnung des Absatzpotenzials/steigender Absatz durch Produkt-, Bedürfnis- und Absatzinnovationen (Erweiterung Absatzpotenzial) sowie durch Prozessinnovationen und steigende Skalenerträge (Verbesserung der Wirtschaftlichkeit). Abschätzung in der Technologietabelle: Qualitativ zusammenfassend.
- **Absatz-/Produktionspotenzial bzw. Sparpotenzial 2001 und 2010** (Fläche des Technologiefeldes, mengenmässige Relevanz). In der Technologietabelle handelt es sich beim Produktionspotenzial um das kumulierte Potenzial in den Jahren 2001 und 2010. Beim Spar-/Effizienzpotenzial dagegen um die Einsparungen, die in den Jahren 2001 und 2010 durch die in diesen Jahren ergriffenen Spar- und Effizienzmassnahmen realisiert werden.

Technologieübersicht als Basis für das Technologieportfolio:

Technologie	Wirtschaftlichkeit 2001	Wirtschaftlichkeit 2010	Innovationspotenzial	Absatzpotenzial bzw. jährl. Sparpotenzial 2001	Absatzpotenzial bzw. Jährl. Sparpotenzial 2010
Hochleistungs-Wärmedämmung	15-25 Rp./kWh	5-15 Rp./kWh	+++++	Baubereich 25'000 m ² /a Total: 120'000m ² /a 2,8 GWh/a	Baubereich >400'000 m ² /a Total >700'000 m ² /a >16 GWh/a
Passivhausfenster (U _{Glas} < 0.5, U _{Rahmen} < 0.8 W/m ² K)	30-80 Rp./kWh	20-50 Rp./kWh	+++++	Einzelne	einige Zehntausend m ²
Sanierungen (Isolation Keller 8 cm, Dach/ Fassade 20 cm)	10-15 Rp./kWh	8-12 Rp./kWh	+++	0.4-0,5 TWh/a	0,6-1 TWh/a
Brennstoffzelle	>50 Rp./kWh _{el}	15-25 Rp./kWh _{el}	++++	-	<500 GWh/a ⁵⁾
Grossverbraucherprozesse	++(+) (heterogen)	++++ (heterogen)	+++	gross	0,85 TWh/a _w ⁴⁾ 5,5 TWh/a _{el} ⁴⁾
Elektrische Geräte	15-20 Rp./kWh	10-15 Rp./kWh	+++	1,3 TWh/a	1,5 TWh/a
Lüftung/Klima zentr. Komfortlüftung	11'000.-/Anl.	9'000.-/Anl.	+++	350 GWh/a	350 GWh/a
Beleuchtung	15-20 Rp./kWh	12-16 Rp./kWh	+++	220 GWh/a	250 GWh/a ⁴⁾
WP in Gebäuden	16-25 Rp./kWh	13-20 Rp./kWh	++	9 MW 3 TWh _{th}	12-15 MW 3-5 TWh _{th} ³⁺⁴⁾
Geothermie (hot dry rock) Wärme Strom	?	18 Rp./kWh _w 30 Rp./kWh _{el}	+(+)	-	0,2 TWh/a _w ³⁾ bis 5 TWh/a _w ⁴⁾ 60 GWh/a _{el}
Konventionelle WKK	10-15 Rp./kWh _{el}	8-12 Rp./kWh _{el}	+	1,6 GWh/a ²⁾	16 TWh/a
Wind Schweiz	20-40 Rp./kWh ⁶⁾	15-35 Rp./kWh	+++	0,3-1,6 TWh/a	0,3-1,6 TWh/a
Thermische Solar Kollektoren	25-30 Rp./kWh	20-25 Rp./kWh	++	290 GWh/a ²⁾	>1 TWh/a ³⁾
Holzfeuerungen	15-25 Rp./kWh	10-20 Rp./kWh	+(+)	6 TWh/a	10 TWh/a ¹⁾
Abwärme (extern)	10-16 Rp./kWh	9-15 Rp./kWh	+	8 TWh/a ohne KVA	8 TWh/a ⁴⁾ ohne KVA
Photovoltaik	90-110Rp./kWh	60-75 Rp./kWh	++	12 GWh/a ²⁾	100 GWh/a ³⁾

1) Nur nachhaltig nutzbares **einheimisches** Potenzial (**e c o n c e p t**/Infras 1999 [14])

2) Effektive Produktion 2001 gem. Energiestatistik (nicht Potenzial 2001)

3) Gantner et al. 2001 [7]

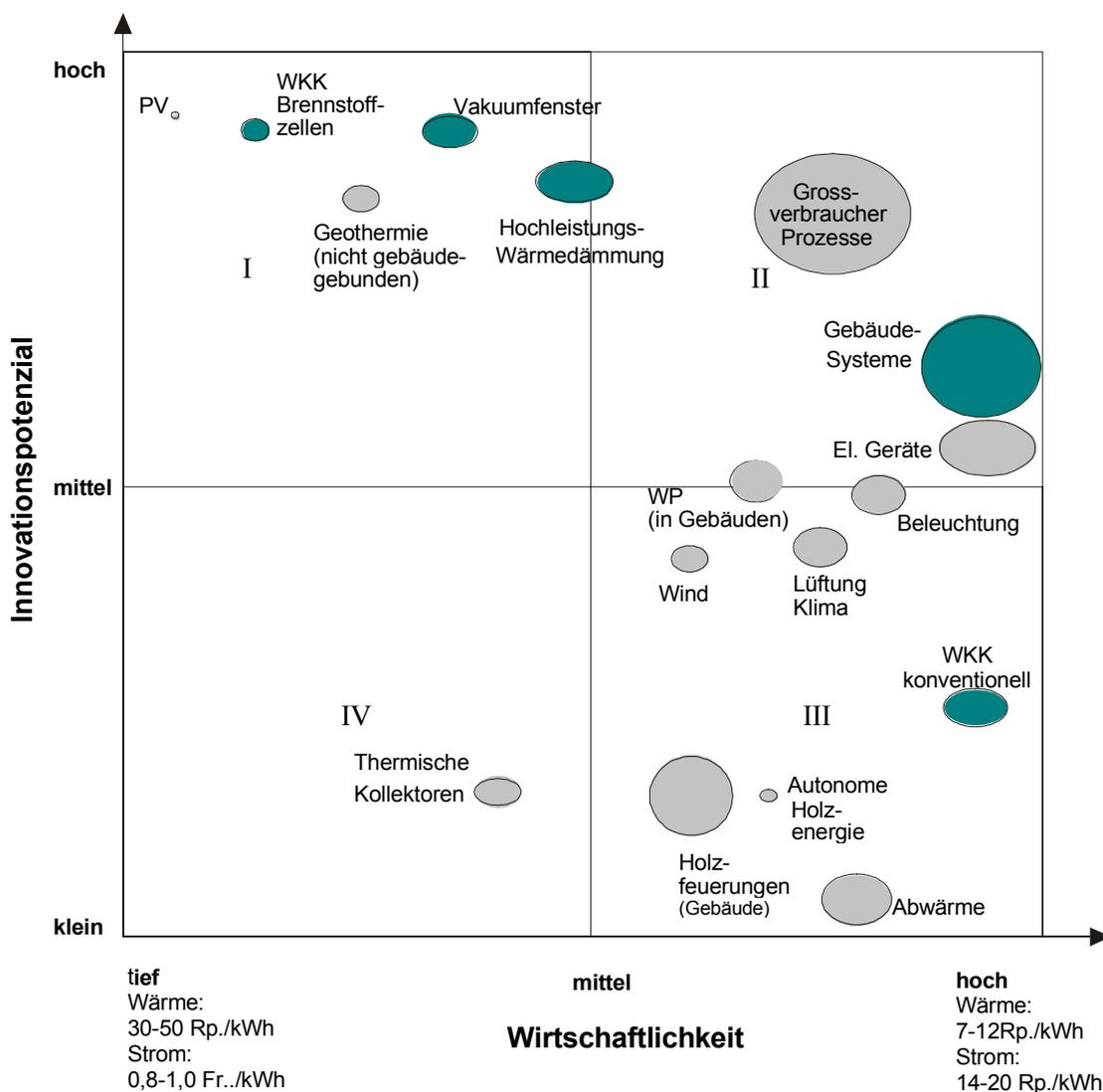
4) **e c o n c e p t**/Infras 1999 [14]

5) Aufnahme Serienproduktion ca. 2007, Potenzial 2020 1 TWh/a (Gantner et al. 1999 [7])

Tabelle 9 Technologiespezifische Charakteristika, welche die Grundlage für das Technologieportfolio bilden: Erwartete mittlere Energie-(vermeidungs-)kosten, qualitatives Innovationspotenzial und Absatz- bzw. Spar-/Effizienzpotenzial 2001/2010.

Das resultierende Markt-Portfolio umfasst die folgenden vier Quadranten:

- Quadrant I:** Diesem Quadranten werden Produkte/Technologien zugeordnet, welche ein **grosses Innovationspotenzial** aufweisen, die aber unter den heute gegebenen Rahmenbedingungen noch weit von der Wirtschaftlichkeitsschwelle entfernt sind. In diesem Bereich liegen die Technologien, bei denen Technologiesprünge erwartet werden können bzw. die aufgrund eines Technologiesprunges sehr hohe Innovationen mit Absatzausweitungen und Kostensenkungspotenzialen erwarten lassen. Diese Technologien sind aufgrund ihres volkswirtschaftlich wertvollen, zukünftigen Innovations- und Anwendungspotenzials für das Technologie-Monitoring besonders interessant, trotz zurzeit noch fehlender Wirtschaftlichkeit. Bei ihnen wird künftiges Wachstum entlang einer technologiespezifischen Lernkurve mit absatzinduzierten Skalenerträgen erwartet. Sie sind Untersuchungsobjekte für Hemmnisanalysen bei harzigem Wachstum. Die langfristig ausgerichtete potenzialorientierte Technologiepolitik wird sich schwerpunktmässig auf die Technologien in diesem Quadranten ausrichten.



Technologieportfolio: Qualitativ geschätztes Innovationspotenzial (Ordinate), Wirtschaftlichkeit (Abszisse) und Absatz-/Spar-/Effizienzpotenzial (Inhalt der Fläche).

Beispiel: Hochleistungswärmedämmungen haben ein beträchtliches künftiges Potenzial (Fläche); sie sind zurzeit eindeutig unwirtschaftlich. Da aber das erwartete Innovationspotenzial als hoch eingeschätzt wird, dürfte sich in Zukunft die Wirtschaftlichkeit stark verbessern.

- **Quadrant II:** In diesem Quadranten befinden sich Produkte/Technologien, welche ein hohes **Innovationspotenzial und eine relativ gute Wirtschaftlichkeit** aufweisen. Diese Technologien sind für das Benchmarking interessant. Aus ihrer Entwicklung in der Vergangenheit kann gelernt werden, besonders wenn sie sich dynamisch entwickelt haben (Analyse der Erfolgsfaktoren und -voraussetzungen für den Durchbruch von Technologien, evtl. Hemmnisse). Technologien in diesem Bereich stehen im Vordergrund der mittelfristig ausgerichteten Energiepolitik (wie Energie-Schweiz).
- **Quadrant III:** Produkte/Technologien, welche bereits vergleichsweise weit im Produktlebenszyklus fortgeschritten sind. Sie sind in der Regel wirtschaftlich oder sehr nahe an der Wirtschaftlichkeitsschwelle, weisen aber nur noch ein begrenztes Innovationspotenzial auf. Sie sind nur dann für das Technologie-Benchmarking interessant, wenn sie sich entweder in der Vergangenheit aussergewöhnlich entwickelt haben oder wenn grosse Unsicherheit bezüglich ihrer künftigen Marktchancen herrscht.
- **Quadrant IV:** Produkte/Technologien mit geringem Innovationspotenzial ohne besondere mittelfristige Perspektiven bei der Wirtschaftlichkeit. Diese Technologien/Produkte sind in der Regel für das Technologie-Benchmarking uninteressant.

Auswahl der vertieft untersuchten Technologiefelder:

Die für das Monitoring untersuchten Technologien werden aufgrund der folgenden Merkmale näher charakterisiert. Davon ausgehend werden für die vorliegende Studie vier Technologien mit unterschiedlichen Merkmalsausprägungen für das Monitoring ausgewählt. Merkmale zur Technologiebeschreibung (siehe untenstehende Tabelle):

- **Innovationspotenzial:** Energetische Verbesserungen (Einsparungen, Effizienzsteigerungen, Substitution nichterneuerbarer Energien), produktionstechnische Rationalisierungspotenziale, Vermarktungsinnovationen mit Potenzial zu Absatzsteigerungen (und absatzbedingten Skaleneffekten), die bis 2010 (- 2015) erwartet werden können.
- **Relevanz bzw. künftiges Absatz- und Effizienz-/Sparpotenzial:** Die mengenmässige Relevanz bis 2010 (- 2015) hängt einerseits vom bestehenden Anwendungspotenzial für die jeweilige Technologie ab. Dabei spielen Ersatz- bzw. Erneuerungszyklen eine massgebliche Rolle. Insbesondere bei bestehenden Gebäuden muss in der Regel davon ausgegangen werden, dass neue Technologien erst bei Erneuerungen oder beim ohnehin erforderlichen Anlagenersatz eingesetzt werden. Der künftige Marktanteil einer neuen Technologie im oben erwähnten Anwendungsbereich der Technologie wird durch Produkte-, Prozess- und Vermarktungsinnovationen beeinflusst, welche zu tieferen Technologiekosten mit tieferen spezifischen Energiekosten führen. Die erwartete Relevanz einer Technologie hängt vielfach von nichtenergetischen Nutzen ab, die die Technologien vermitteln (Beispiel Komfortlüftung, die nicht primär aus energetischen Gründen installiert werden, sondern um die Behaglichkeit und die Raumluftqualität zu verbessern).
- **Entwicklung der Technologie in den letzten 10 Jahren:** Die vergangene Entwicklung weist auf den zu erwartenden Verlauf der Produktelebenszyklus-Kurve und die aktuelle Position der jeweiligen Technologie auf dieser Kurve hin. Für das Technologie-Monitoring sind vor allem Technologien mit starken energetischen Verbesserungen (Ausbeute, Wirkungsgrad) und Kostensenkungen sowie Technologien, die sich in neuen Absatzbereichen etablieren konnten bzw. können interessant.

Technologie	Entwicklung in Vergangenheit	Innovationspotenzial	Relevanz: Absatz-/ Effizienzpotenzial 2010	Handlungsspielraum	Relevanz (Anzahl '+')
Hochleistungs-Wärmedämmung	++++	++++	+++	+++	14
Passivhausfenster ($U_{\text{Glas}} < 0.5$, $U_{\text{Rahmen}} < 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$)	+++	++++	++	+++	12
Gebäudesysteme/ Sanierungen	+++	+++	+++++	+++(+)	14,5
Brennstoffzelle	++++	++++	++	+++	13
Grossverbraucherprozesse	+++	+++	++++	++	12
Elektr. Geräte	+++	+++	+++	++(+)	11,5
Lüftung/Klima	+++	+(+)	+++	++	9,5
Beleuchtung	+++	++	+++	++	9
WP	++	++(+)	+++(+)	++(+)	10,5
Geothermie	+	+++	+(+)	++	7,5
Konventionelle WKK	++	++	++++	++	10
Wind	+++	+(+)	+	++(+)	8
Thermische Solar-Kollektoren	++	+	++	++	7
Holzfeuerungen	+(+)	+	+++	+++	8,5
Abwärme	+	(+)	+++	+++	7,5
Photovoltaik	++	+++	(+)	++	7,5

Tabelle 10 Bewertungstabelle für die Auswahl der zu untersuchenden Technologiefelder; die ausgewählten Felder sind markiert.

- **Handlungsspielraum für Technologieförderung:** Aus energiepolitischer Sicht geht es beim Monitoring vor allem um Technologien, deren Entwicklung von der Schweiz mitbeeinflusst werden kann, wo also ein gewisser technologie- und energiepolitischer Handlungsspielraum besteht. Es können zwei Dimensionen unterschieden werden:
 - Technologiepolitischer Handlungsspielraum: Beeinflussungsmöglichkeiten der technologischen Entwicklung in der Schweiz
 - Energiepolitischer Handlungsspielraum: Direkte Fördermassnahmen und flankierende Massnahmen (Ausbildung, Information, Kommunikation, Qualitätssicherung) der Energiepolitik.

Hochleistungs-Wärmedämmung (HLWD)

Mit der HLWD wird eine Technologie ausgewählt, von der erwartet wird, dass sie bald in die Wachstumsphase gelangt, mit sinkenden Preisen und hohen Mengenausweitungen. HLWD ist für das Technologie-Monitoring hoch interessant. Die Technologie wird vorläufig aus Kosten- und Handling-Gründen erst für Spezialanwendungen eingesetzt. Sie hat aber ein grosses Potenzial bei vielfältigen Anwendungen, insbesondere hat sie das Potenzial, neue konstruktive und architektonische Lösungen zu ermöglichen (Bedürfnis- und Absatzinnovationen, Produkteinnovationen) und damit neue Absatzmöglichkeiten zu erschliessen. Durch die zu erwartende Absatzsteigerung ist mittelfristig mit stark sinkenden Preisen zu rechnen (Skaleneffekte). Interessant ist das Monitoring der Entwicklung von HLWD-Anwendungen in Anwendungsbereichen normaler Wärmedämmung (Ausmass der Verdrängung) sowie von HLWD-Anwendungen, die zu neuen Produkten bzw. zu neuartigen architektonischen und/oder technischen Lösungen führen.

Brennstoffzellen und WKK-Anlagen

Mit den Brennstoffzellen und den WKK-Anlagen werden ganz unterschiedliche Technologien für das Monitoring ausgewählt, die jedoch dasselbe Produkt liefern: Elektrizität und Wärme als Koppelprodukt (bzw. umgekehrt). Von der Brennstoffzellentechnologie werden in Zukunft weitere grosse Entwicklungsschritte erwartet, zurzeit bestehen aber erst Pilotanlagen. Dagegen werden WKK-Anlagen seit Jahren vermarktet und das erwartete Innovationspotenzial ist begrenzt. Weil sich die Brennstoffzellentechnologie auch für kleine Leistungen, d.h. für dezentrale Versorgungsstrukturen eignet, ist der Technologievergleich besonders interessant. In Zukunft könnten Brennstoffzellen deswegen einen grösseren potenziellen Markt haben als die WKK-Anlagen. Die WKK-Technologie ist erst über 100 kW elektrische Leistung wirtschaftlich. Es werden zwar auch Kleinmotoren angeboten, die jedoch viel weniger wirtschaftlich sind und im Gegensatz zu den Brennstoffzellen ein sehr begrenztes Kostensenkungspotenzial aufweisen.

Wärmepumpen

Anhand der WP-Technologie können die Voraussetzungen und die Entwicklung einer Technologie, die in einem Teilbereich den Durchbruch geschafft hat, verfolgt werden (zur Zeit haben elektrische WP bei neuen Einfamilienhäusern einen Marktanteil von rund 40 %, mit einem Anteil von 60 % Luft-Wasserwärmepumpen, welche eine mittlere Jahresarbeitszahl von 2,8 aufweisen). Interessant ist die künftige Entwicklung der Jahresarbeitszahl JAZ für die verschiedenen WP-Systeme, der Systemeinbindung und der Qualität über die Betriebsdauer. Weitere Fortschritte bei der JAZ sowie sinkende Vorlauftemperaturen infolge von tiefen Energiekennzahlen Raumwärme können die Voraussetzungen für zunehmende Wettbewerbsfähigkeit und einen steigenden künftigen Absatz bilden.

2.2 Energiegestehungskosten

Grundlagen/Abgrenzungen

Die Gestehungskosten der Energie bilden den Ausgangspunkt für die wirtschaftliche Einschätzung der Technologien und für das wirtschaftliche Benchmarking. Damit sowohl Energieproduktionstechnologien als auch Energiespar- und Energieeffizienztechnologien miteinander verglichen werden können, werden grundsätzlich **Nutzenergiekosten** ermittelt. Dabei müssen die für die jeweilige Technologie bzw. den jeweiligen Technologievergleich relevanten **Systemgrenzen** festgelegt werden, d.h. den "scope" der Analyse. Dazu gehören:

- **Physische Systemgrenzen:** Die physischen Systemgrenzen werden so eng wie möglich gefasst. Zur Vereinfachung schlagen wir vor, bei der Energieproduktion und beim Energiesparen bzw. bei Energieeffizienzsteigerungen im Normalfall von unterschiedlichen Systemgrenzen auszugehen, die nur bei Bedarf erweitert werden:

- **Energieproduktion** (Brennstoffzelle, Wärmepumpe, Windenergie, Solarkollektor, Holzschnitzelfeuerung, BHKW, etc.): Begrenzung der physischen Systemgrenze auf diejenigen Anlagenelemente, die für den Betrieb notwendig sind wie Anlage, Speicher, Brennstofflager/zuführung, Gebäude sowie externe Wärmeverteilung bei Holzschnitzelfeuerung und BHKW. Bestandteile, welche für die verschiedenen Technologien identisch sind (z.B. interne Wärmeverteilung), werden nicht berücksichtigt.
- **Energiesparmassnahmen** (Fenster, Isolation, Sonnenschutz, Komfortlüftung, Verbrauchsregelung, -steuerung und -erfassung, etc.): Berücksichtigt werden sämtliche Komponenten, welche für die Realisierung der Massnahme notwendig sind, inkl. bauliche Massnahmen (z.B. Raumbedarf für Lüftungsanlagen). Komponenten, welche durch die Massnahme nicht beeinflusst werden (z.B. Wetterschutz bei Isolation), werden nicht berücksichtigt.
- **Zeitlicher Analysehorizont:** Grundsätzlich wird vom Life-Cycle-Ansatz ausgegangen, d.h. die Analyse wird mittels Einbezug sämtlicher Kosten und Nutzen über die (technische) **Lebensdauer** der jeweiligen Technologieanwendung vorgenommen. Je nach Fragestellung können also auch Abbruch/Entsorgung/Wiederherstellungsaufwendungen mitberücksichtigt werden. Da dies bei Realisierungsentscheidungen in der Regel nicht geschieht, wird im Folgenden speziell angegeben, wenn die Aufwendungen für Abbruch/Entsorgung/Wiederherstellung eingerechnet sind. Wichtig ist, dass von identischen zeitlichen Analysehorizonten ausgegangen wird.

Die Energie-, Lohn- und Zinskosten entwickeln sich während der Lebensdauer einer Technologieanwendung dynamisch weiter. Für die Berechnung der Energiegestehungskosten wird nicht die tatsächliche Entwicklung dieser Kosten berücksichtigt (welche zumindest für ex-post-Analysen teilweise vorhanden wären), sondern die zum Zeitpunkt der Realisierung der Technologieanwendung üblichen Werte. Damit werden die Grundlagen, welche für die Realisierung einer Energiesparmassnahme oder einer Produktionsanlage entscheidend sind, nachvollzogen.

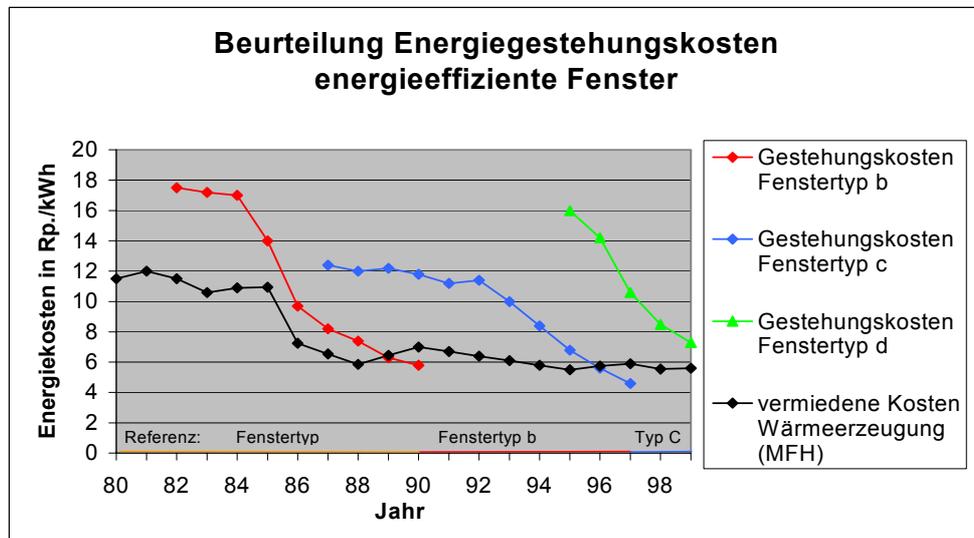
- **Umfang der einbezogenen Kosten, Kostenelemente:**
 - **Investitionskosten** bzw. davon abgeleitete Kapitalkosten entsprechend den physischen Systemgrenzen. Direkte Förderbeiträge der öffentlichen Hand (Subventionen) werden nicht berücksichtigt.
 - **Betriebskosten:** Allgemeine Betriebskosten (Versicherung, verbrauchsunabhängige Gebühren/Abgaben, Bedienung, Verwaltung, etc.), Unterhaltskosten (periodisch anfallende Unterhalts- und Wartungskosten, Kosten für Betriebsstoffe) und Energiekosten (inkl. MWSt., Energieabgaben und energieverbrauchsbezogene Gebühren).
 - **Externe Kosten:** Mit der Technologienutzung verbundene Kosten, die nicht von den Nutzern bezahlt werden, die jedoch von der Gesamtwirtschaft getragen werden, wie Folgekosten von Schadstoffemissionen, Klimakosten, Kosten nicht versicherter Risiken, Kosten von Natur- und Landschaftsbeeinträchtigungen, etc.).
 - **Nutzen bzw. Zusatznutzen:** Qualitativ oder monetär abschätzbare Nutzen einer Technologieanwendung, die üblicherweise nicht in der betriebswirtschaftlichen Kosten-/Nutzenrechnung enthalten sind (Lärminderungen, Komfortverbesserungen, Erhöhung Betriebs- und Versorgungssicherheit, etc.). Wie bereits erwähnt, können diese Zusatznutzen für Investitionsentscheidungen massgeblicher sein als die energetischen Nutzen. Die Zusatznutzen werden in dieser Arbeit aus methodisch-praktischen Gründen jedoch nicht berücksichtigt.

Bewertung der Energiewirkungen

Grundsätzlich wird die Entwicklung der Energiegestehungskosten bzw. der Kosten der eingesparten Energie einer Technologie in $\text{Rp./kWh}_{\text{Nutzenergie}}$ analysiert. Müssen für eine konkrete Fragestellung Technologien miteinander verglichen werden, sind die oben aufgeführten Grundsätze bei der Festlegung identischer Systemgrenzen zu beachten.

- **Energiesparmassnahmen:** Energieeinsparungen werden nach dem Opportunitätskostenansatz bewertet, d.h. mit Hilfe der resultierenden Energiekosteneinsparungen gegenüber der marktüblichen Technologie (siehe Graphik). Zu beachten ist, dass die marktübliche Technologie im Verlaufe

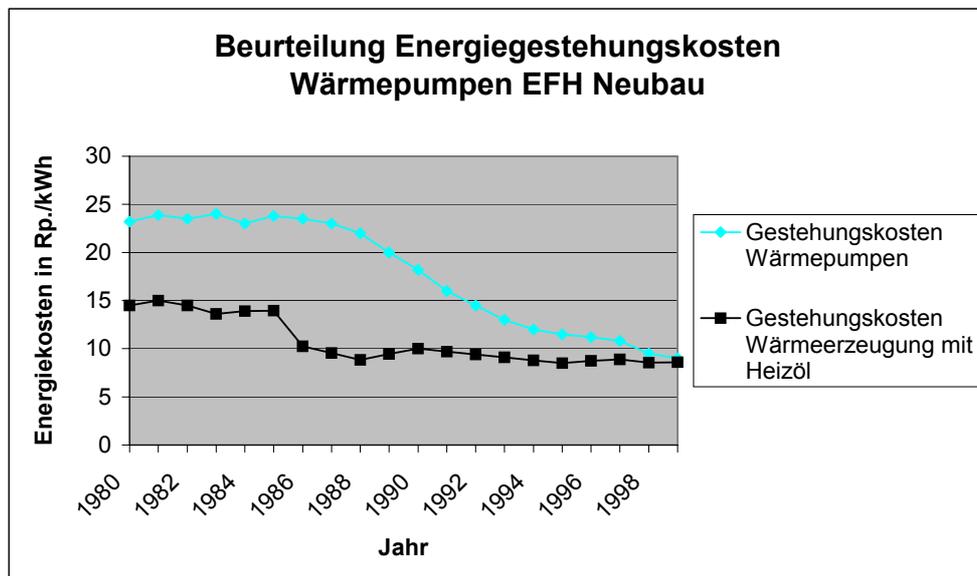
der Zeit wechseln kann. Zur Beurteilung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit werden die vermiedenen Energiekosten einer Standard-Energieproduktion aufgezeigt.



G:\2001\019\3-Bearb\Zwischenbericht1-a.xls\Tabelle1

Illustration zur Beurteilung der Konkurrenzfähigkeit von Energieeffizienztechnologien (hier Fenster)

- Energieproduktion:** Zur Beurteilung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit werden im Bereich der Wärme- und der Stromerzeugung die Energiegestehungskosten marktüblicher Referenzsysteme nach derselben Methode ermittelt. Da die Wahl einer marktüblichen Technologie als Referenzsystem nicht immer ganz eindeutig ist, wird das gewählte System genau beschrieben. Bei den Technologien zur Elektrizitätserzeugung werden die Bezugskosten resp. die Rückliefererträge als Referenzgröße verwendet.



G:\2001\019\3-Bearb\Zwischenbericht1-a.xls\Tabelle1

Illustration zur Beurteilung der Konkurrenzfähigkeit von Technologien zur Energieerzeugung

- Koppelproduktion:** Bei Produktionstechnologien, die mehrere energetische Outputs aufweisen (Brennstoffzelle, BHKW, etc.), wird das Neben- oder Koppelprodukt mit dem Opportunitätskostenansatz bewertet. Massgeblich sind somit die mit dem Koppelprodukt vermiedenen Kosten bzw. die erzielbaren Erträge (beispielsweise die vermiedenen Wärmegestehungskosten bei BHKW, bei Abwärme von Elektromotoren oder Druckluftherzeugung).

Berechnungsmodell

Die Berechnung der Energiegestehungskosten erfolgt nach den im Hochbau üblichen Verfahren der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung gemäss Entwurf SIA 480. Wir schlagen vor, mit realen Werten zu rechnen (realer Zinssatz: 3,5 % p.a., vgl. Entwurf SIA 480). Künftige Veränderungen relativer Preise werden transparent ausgewiesen und begründet (z.B. reale Verteuerung Energie, Kapital oder Arbeit).

Alle Kostenangaben werden anhand des Landesindex der Konsumentenpreise auf Barwerte im Jahre 2000 umgerechnet.

Bezeichnung	Erläuterung	Berechnung ¹⁾
Jahreskosten		
Kapitalkosten	Kosten für Verzinsung und Amortisation der notwendigen Investitionen	Investitionskosten [Fr.] * Annuitätsfaktor [%]
Betriebskosten	allgemeine Betriebskosten Wartungs-/Unterhaltskosten Energiekosten	Kosten Versicherung/Steuern [Fr./a]+ Aufwand Bedienung/Verwaltung [h/a]* Kosten Bedienung/Verwaltung [Fr./h] Kosten für Wartung/Unterhalt [Fr./a]+ Kosten Betriebsstoffe [Fr./a] Leistung [kW]* Vollbetriebsstunden [h/a]* Endenergiepreis [Fr./kWh]+ Hilfsenergiebedarf [kWh/a]* Hilfsenergiepreis [Fr.kWh]
Jahresertrag*	Wert der produzierten sekundären Nutzenergie plus Wert allfälliger monetärer Zusatznutzen * nur bei Systemen, welche Strom und Wärme erzeugen	Leistung [kW]* Nutzungsgrad sek.* Vollbetriebsstunden [h/a]* Wert Sekundärenergie [Fr./kWh]
Produzierte Energie	Produzierte (primäre) Nutzenergie in kWh/a	Leistung [kW]* Nutzungsgrad* Vollbetriebsstunden [h/a]
Energiegestehungskosten	Gestehungskosten Nutzenergie in Rp./kWh	(Jahreskosten-Jahresertrag)/ produzierte Energie
Externe Kosten	externe Kosten in Rp./kWh	externe Kosten [Rp./kWh] gem. 'Kalkulatorische Energiepreiszuschläge'
Zusatznutzen	nicht-monetärer Zusatznutzen	qualitative Beurteilung

1) der genaue Berechnungsgang kann für die einzelnen Technologien in Abhängigkeit der verfügbaren Daten variieren.

G:\2001\019\3-Bearb\[Schichtenmodell-a.xls]Berechnungsmodell

Tabelle 11 Berechnungsmodell zur Berechnung der Energiegestehungskosten

Das Modell zur Ermittlung der Energiegestehungskosten umfasst folgende Elemente:

Betriebswirtschaftliche Rechnung:

- Kosten, welche sich zusammensetzen aus:
 - Kapitalkosten
Kosten für Verzinsung und Amortisation der Investitionskosten
 - Betriebskosten
 - Allgemeine Betriebskosten (Versicherung, verbrauchsunabhängige Gebühren/Abgaben, Bedienung, Verwaltung, etc.)
 - Unterhaltskosten (periodisch anfallende Unterhalts- und Wartungskosten, Kosten für Betriebsstoffe)
 - Energiekosten (inkl. MWSt., Energieabgaben und energieverbrauchsbezogene Gebühren)
- Erträge
bei Anlagen, welche Wärme und Strom erzeugen oder einsparen, entspricht dies dem Wert der produzierten Sekundärenergie
- Produzierte Energie

Erweiterte Rechnung

- Externe Kosten
- Qualitative sowie monetäre und nicht-monetäre Zusatznutzen und -kosten, soweit im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Rechnung nicht berücksichtigt werden wie z.B. Emissionen, graue Energie, Risiken (Betrieb, evtl. Versorgung; Eintretenswahrscheinlichkeit, Auswirkungen)

Faktoren

Die einzelnen Faktoren des Berechnungsmodells müssen unterschiedlich behandelt werden, um mit vertretbarem Aufwand eine ausreichend genaue Beurteilung der Entwicklung der Energiegestehungskosten einer Technologie zu erlauben.

Planungsspezifische Faktoren

Es wird davon ausgegangen, dass die analysierten Anlagen entsprechend üblichen Richtwerten geplant worden sind. Planungsfehler, welche sich zum Beispiel auf die erzielten Vollbetriebsstunden auswirken, werden nicht berücksichtigt. Die Anlagegrösse ist durch die Auswahl des zu untersuchenden Technologiefeldes gegeben.

Technologiespezifische Faktoren

Faktoren, welche von Technologiefortschritten stark beeinflusst werden (z.B. Investitionskosten, Nutzungsgrad) und die einen spürbaren Einfluss auf die Energiegestehungskosten haben, werden mit einem Monitoring möglichst genau analysiert. Faktoren, welche von technologischen Fortschritten wenig beeinflusst werden, werden anhand von Erfahrungswerten und Standardannahmen bestimmt.

Allgemeine Wirtschaftlichkeitsfaktoren

Äussere Faktoren, wie die (End-)Energiepreise, die Zinssätze und die Lohnkosten können die Entwicklung der Energiegestehungskosten ebenfalls massiv beeinflussen. Für diese Grössen können anerkannte Quellen verwendet werden (siehe folgendes Kapitel).

Faktor	Einheit	Bemerkung	Quelle, Herleitung
Planungsspezifische Faktoren			
Leistung	kW	per Definition für die jeweilige Technologie gegeben	-
Vollbetriebsstunden	h/a	Planung entsprechend üblichen Richtwerten	-
Technologiespezifische Faktoren			
Nutzungsgrad			je nach Beurteilung von Dynamik und Elastizität: Monitoring oder Standardannahmen
Nutzungsgrad sek.		nur für Anlagen, welche Strom und Wärme erzeugen	
Nutzungsdauer	a		
Hilfsenergiebedarf	kWh/a		
Aufwand Bedienung/Verwaltung	h/a		
Investitionskosten	Fr.	ohne Berücksichtigung von Förderbeiträgen	
Kosten Wartung/Unterhalt	Fr./a	häufig: Kosten für Wartungsverträge	
Kosten Betriebsstoffe	Fr./a		
Kosten Versicherung/Steuern	Fr./a	Kosten für Versicherung, verbrauchsunabhängige Gebühren/Abgaben	
Allg. Wirtschaftlichkeitsfaktoren			
Zinssatz	%	realer Zinssatz	3.5% gem. Entwurf SIA 480
Endenergiepreis	Fr./kWh	inkl. Abgaben/Steuern	Quelle: BFS, Landesindex der Konsumentenpreise;
Wert Sekundärenergie	Fr./kWh	inkl. Abgaben/Steuern	künftige Energiepreisseteigerung gem. Entwurf SIA 480
Hilfsenergiepreis	Fr./kWh	inkl. Abgaben/Steuern	Quelle?
Kosten Bedienung/Verwaltung	Fr./h	inkl. Abgaben/Steuern	Quelle?
Teuerung	%	zur Berechnung der Barwerte im Jahre 2000	Quelle: BFS, Landesindex der Konsumentenpreise
Zusätzliche Faktoren			
externe Kosten	Rp./kWh	verursachte Kosten, welche von der Allgemeinheit getragen werden	Quelle: Infras, Kalkulatorische Energiepreiszuschläge
Zusatznutzen	-	Nutzen, welche üblicherweise in einer betriebswirt- schaftlichen Kosten-Nutzen-Rechnung fehlen	-

G:\2001\019\3-Bearb\Schichtenmodell-a.xls\Faktoren allg.

Tabelle 12 **Behandlung der einzelnen Faktoren im Technologie-Monitoring**

Unter Umständen müssen (kostenrelevante staatliche Vorschriften, Emissionsvorschriften, etc.) in die Betrachtung einbezogen werden. Mindestens muss sichergestellt sein, dass beim Monitoring von einheitlichen Rahmenbedingungen und Vorschriften ausgegangen wird.

Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring analysiert werden

Technische und wirtschaftliche Fortschritte einer Technologie widerspiegeln sich unterschiedlich stark auf den einzelnen Ebenen des Kostenmodelles. Grundsätzlich drücken sich Technologiefortschritte am stärksten in folgenden Faktoren aus:

- Sinkende spezifische Investitionskosten von Schlüsselkomponenten
- Sinkende Unterhalts- und Betriebskosten
- Gesteigerte energetische Effizienz, welche i.d.R. über eine Erhöhung des Nutzungsgrades die spezifischen Nutzenergiekosten pro kWh senkt.
- Bessere Abstimmung von Energiedienstleistungsnachfrage und Energieangebot (mit bedarfsabhängiger Regelung, Anreizen zu sparsamem Verbrauch), wodurch der (Nutz-) Energieverbrauch und die Energiekosten pro Energiedienstleistungseinheit sinken.

Die Faktoren, auf welche technologische Fortschritte einen starken Einfluss haben, werden mit einem gezielten Monitoring analysiert. Die übrigen Faktoren werden über Erfahrungswerte oder Standardannahmen bestimmt.

Die Bestimmung der Faktoren bzw. Indikatoren, welche mit einem Monitoring zu analysieren sind, muss differenziert für die einzelnen Technologien erfolgen. Dabei werden folgende Kriterien berücksichtigt:

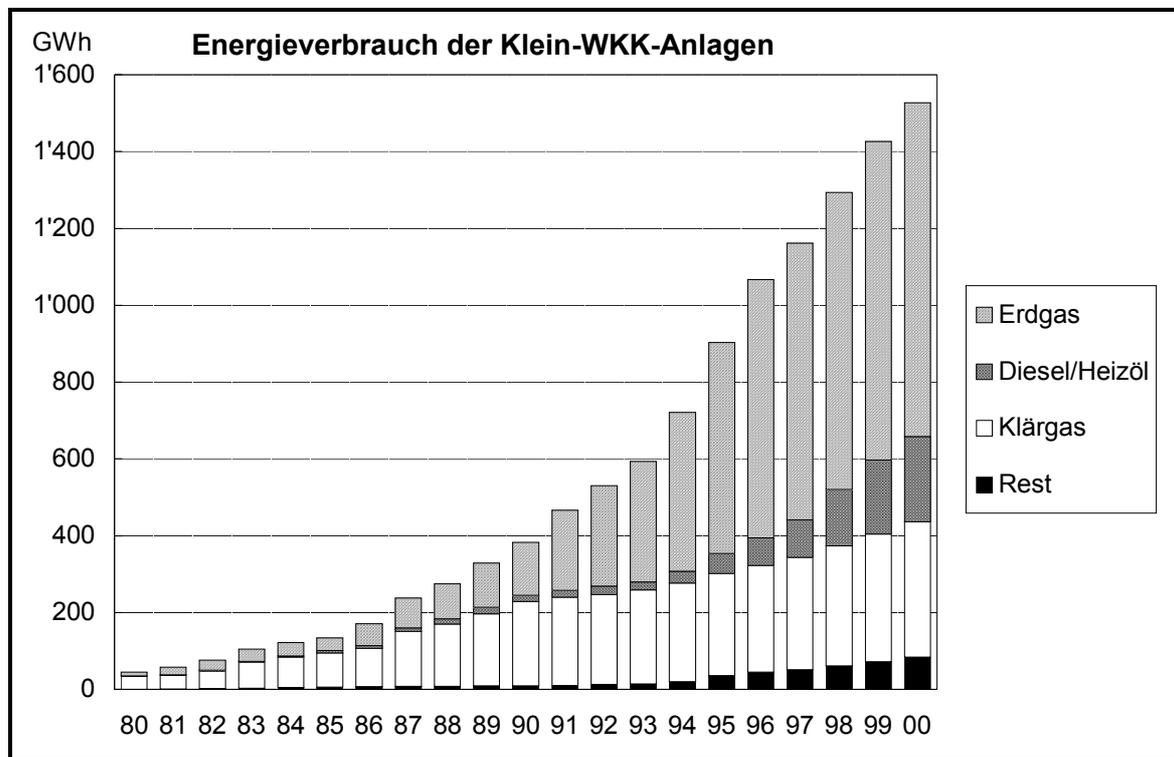
- Grobbeurteilung der **Dynamik** (technisch und/oder wirtschaftlich), mit welcher sich ein Faktor entwickelt. Eine grosse Dynamik bedeutet, dass sich ein Faktor durch technologische Fortschritte in den vergangenen Jahren stark entwickelt hat, oder dass ein bedeutendes Potenzial für künftige Entwicklungen besteht.
- Beurteilung der (Gestehungskosten-) **Relevanz** der einzelnen Faktoren: Wie stark wirkt sich eine bestimmte Änderung eines Faktors auf die Energiegestehungskosten aus. Eine grosse Relevanz bedeutet, dass sich eine Änderung des Faktors sehr stark auf die Energiegestehungskosten auswirkt.

3 Motorische Wärmekraftkopplung

3.1 Marktsituation

Die Elektrizitätsproduktion aus WKK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung unter 1 MW hat sich zwischen 1990 und 2000 in der Schweiz mehr als verfünffacht. Trotzdem besteht noch ein enormes Ausbaupotenzial, da das durch den Wärmemarkt vorgegebene technische Potenzial bisher erst zu 4 % genutzt wird (siehe [3]).

Als Energieträger kommen insbesondere Erdgas (57 %), Klärgas (23 %) und Diesel (resp. Heizöl 15 %) zum Einsatz. Während in den letzten Jahren das Wachstum für Erdgas und Diesel sehr stark war, wächst die Elektrizitätsproduktion aus Klärgas nur noch langsam an, da das Potenzial bereits zu einem guten Teil erschöpft sein dürfte. Biogas (aus Grünabfällen oder nachwachsenden Rohstoffen) spielt als Energieträger für WKK-Anlagen trotz des beachtlichen Potenziales bisher nur eine untergeordnete Rolle.



G:\2001\007\KW-Ausw\AA-EEVT.XLS\Anhang D.2e Ber2

Energieverbrauch WKK-Anlagen unter 1 MW_e [13]

Im folgenden Kapitel wird die motorische Wärmekraftkopplung mit Erdgas- resp. Dieselmotoren mit einer elektrischen Leistung von 100 und 400 kW näher analysiert.

3.2 Berechnungsmodell

Definition Fallbeispiele

Um die Entwicklung von Motor-Blockheizkraftwerken zu untersuchen, werden die Stromgestehungskosten von BHKW-Anlagen mittlerer und grösserer Leistung (ca. 100 kW_{el} resp. 400 kW_{el}) unter folgenden Voraussetzungen analysiert:

- Mit Erdgas resp. Diesel betriebene Motoren mit 3-Wege- oder SCR-Katalysator, welche die verschärften Grenzwerte, wie sie in Massnahmegebieten der Luftreinhalteverordnung gelten, einhalten können.
- Einbau des BHKW in einer Heizzentrale mit 500 kW resp. 1'500 kW thermischer Leistung. Die Auslegung des BHKW erfolgt gemäss Ravel, Wärmekraftkopplung für Nichtwohnbauten (Gewerbe, Industrie, Spitäler, o.ä.). Die thermische Leistung des BHKW beträgt 200 kW resp. 600 kW und somit 40 % der Gesamtleistung.
- Die genaue elektrische Leistung des BHKW hängt vom Stand der Technologie ab. BHKW mit einem höheren elektrischen Nutzungsgrad verfügen über eine elektrische Leistung, welche höher ist wie 100 kW resp. 400 kW.
- Der Spitzenlastkessel wird aus wirtschaftlichen Gründen mit Heizöl betrieben und auf 80 % des Wärmeleistungsbedarfes ausgelegt.

Das Berechnungsmodell ist detailliert im Anhang A1 ersichtlich.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Zur Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring analysiert werden sollen, werden in einem ersten Schritt jene Faktoren bestimmt, welche durch Fortschritte in der BHKW-Technologie beeinflusst werden können. Dies sind insbesondere sämtliche technisch/wirtschaftlichen Faktoren der BHKW-Module (Investitionskosten, Nutzungsgrad Strom und Wärme, Wartungs- und Versicherungskosten, etc.) sowie die Investitionskosten für die hydraulische und elektrische Einbindung.

Für die gewählten Faktoren, werden gemäss Kapitel 3.2.5 folgende Eigenschaften beurteilt:

- Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung.
Die Beurteilung erfolgt aufgrund von Expertengesprächen.
- (Gestehungskosten-)Relevanz
Die Bestimmung der Relevanz erfolgt aufgrund einer Sensitivitätsanalyse, bei welcher die einzelnen Faktoren ausgehend von einem Basiswert für das Jahr 2000 um ± 20 % variiert werden.

Beurteilung der Dynamik der bisherigen Entwicklung

Die Entwicklung der BHKW-Technologie war in der Schweiz in den letzten 10 Jahren insbesondere durch stark sinkende Investitions- und Wartungskosten (ca. 40 %) geprägt. Eine Entwicklung hat auch bei den Investitionskosten für die Einbindung und bauliche Massnahmen stattgefunden, was allerdings vor allem auf die allgemeine Baukostenentwicklung zurückzuführen ist. Die Versicherungskosten sind konstant geblieben.

Der Nutzungsgrad elektrisch hat sich in den vergangenen Jahren markant verbessert. Dagegen haben sich der Nutzungsgrad thermisch sowie der Hilfsenergieverbrauch in den vergangenen 10 Jahren kaum spürbar verbessert. Die Lebenserwartung der BHKW-Module konnte nur dadurch verbessert werden, dass mangelhafte Angebote vom Markt verschwunden sind. Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird daher nach wie vor von einer Nutzungsdauer von 15 Jahren ausgegangen.

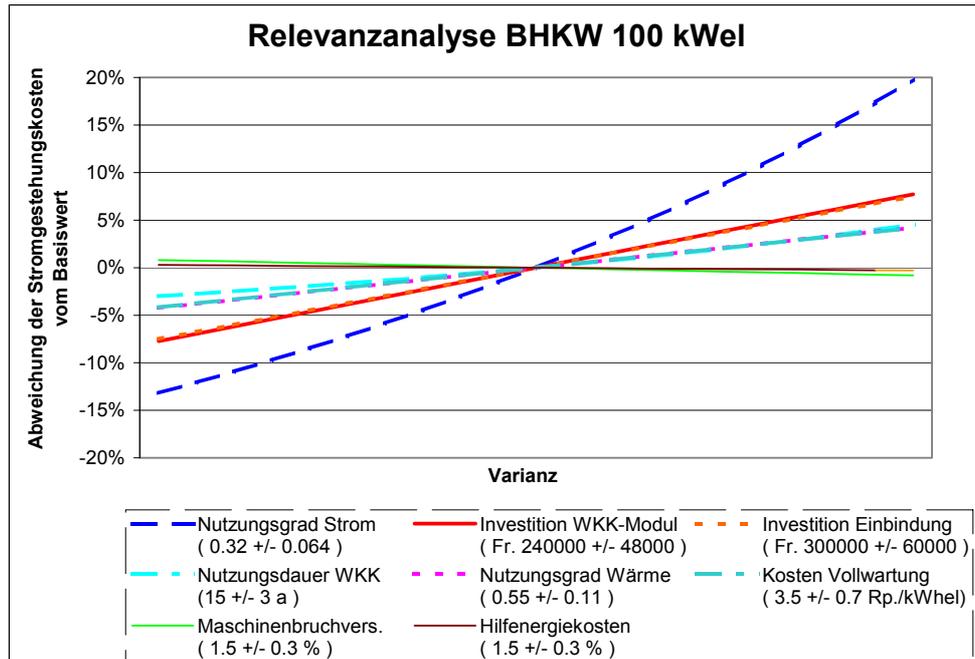
Beurteilung der Dynamik der künftigen Entwicklung

Die bisherige Entwicklung bei den Investitions- und Wartungskosten kann fortgesetzt werden, wenn sich die Rahmenbedingungen des Marktes (Konkurrenzdruck und Volumen) entsprechend entwickeln.

Der Nutzungsgrad elektrisch kann in Zukunft weiter verbessert werden. Neue Ansätze (z.B. durch ETH-Gasmotor mit Abgasturbolader und gekühlter Abgasrückführung) werden bereits erfolgversprechend eingesetzt.

(Stromgestehungskosten-) Relevanz

Die Relevanz der einzelnen Faktoren ist in der folgenden Grafik dargestellt.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WKK-100e.xls\Relevanzanalyse

Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten für BHKW 100 kW_{el} zur Beurteilung der Relevanz der technisch/wirtschaftlichen Faktoren

Lesebeispiel: Eine Änderung der Investitionskosten für das WKK-Modul um +/- 20 % (Fr. 240'000 +/- Fr. 48'000) bewirkt eine Veränderung der Stromgestehungskosten um 7 bis 8 %. Um den Einfluss der Faktoren besser vergleichen zu können, sind Kurven der einzelnen Faktoren so an der 0%-Linie gespiegelt, dass sie alle rechts im positiven Bereich liegen.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert analysiert werden, erfolgt anhand einer zusammenfassenden Bewertung der Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung und der Relevanz der einzelnen Faktoren:

	Beurteilung der Faktoren*			Monitoring	
	Dynamik		Relevanz		Wert**
	1990/2000	2000/2010			
Nutzungsgrad Wärme BHKW	1	0	0	0	nein
Nutzungsgrad Strom BHKW	1	3	5	20	ja
Nutzungsdauer BHKW	0	0	1	0	nein
Hilfsenergiekosten BHKW	1	0	0	0	nein
Investitionskosten BHKW	4	3	2	14	ja
Investitionskosten Einbindung Wärme/Strom, Bauliches	2	0	2	4	nein
spez. Wartungskosten BHKW	4	4	1	8	ja
spez. Versicherungskosten BHKW	0	0	0	0	nein

* Massstab für Beurteilung der Faktoren:

5 sehr dynamische Entwicklung (Änderungen > +/-50% innerhalb von 10 Jahren) resp. sehr grosse Relevanz (Sensitivität > 20%)
0 keine spürbare Dynamik/Relevanz

**Beurteilungswert: Summe Dynamik 1990/2000 und Dynamik 2000/2010 multipliziert mit Relevanz

Tabelle 13 Bestimmung der Monitoring-Faktoren motorische Wärmekraftkopplung

Verwendete Erfahrungswerte

Für die Faktoren, welche nicht mit einem Monitoring analysiert werden, werden folgende Erfahrungswerte verwendet:

Faktor	verwendete Werte
Nutzungsgrad Wärme BHKW	¹⁾ 0.88 minus Nutzungsgrad Strom
Nutzungsdauer BHKW	15 Jahre
Hilfsenergiekosten BHKW	1.5% der Brennstoffkosten
Investitionskosten Einbindung Wärme/Strom, Bauliches	Fr. 250'000.— (100 kW _{el}) Fr. 510'000.— (400 kW _{el})
Versicherungskosten BHKW	1.5% der Investitionskosten BHKW-Modul

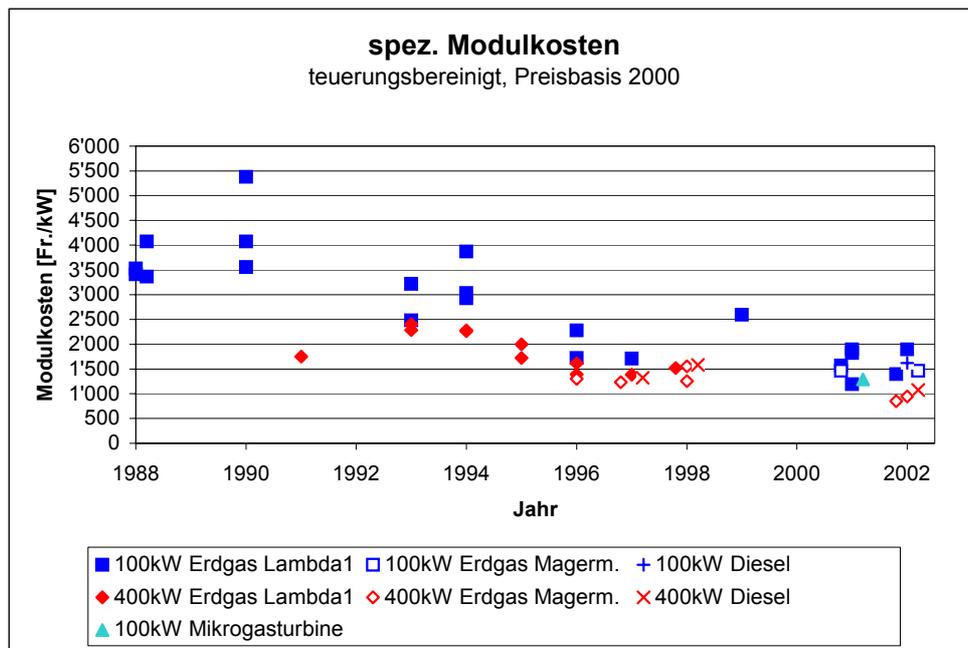
1) wurde in der Regel zusammen mit dem Nutzungsgrad Strom erhoben, die aufgeführte Annahme wurde nur falls nötig verwendet.

Tabelle 14 Verwendete Erfahrungswerte zur Berechnung der Stromgestehungskosten

3.3 Bisherige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Faktoren

BHKW-Modulkosten:



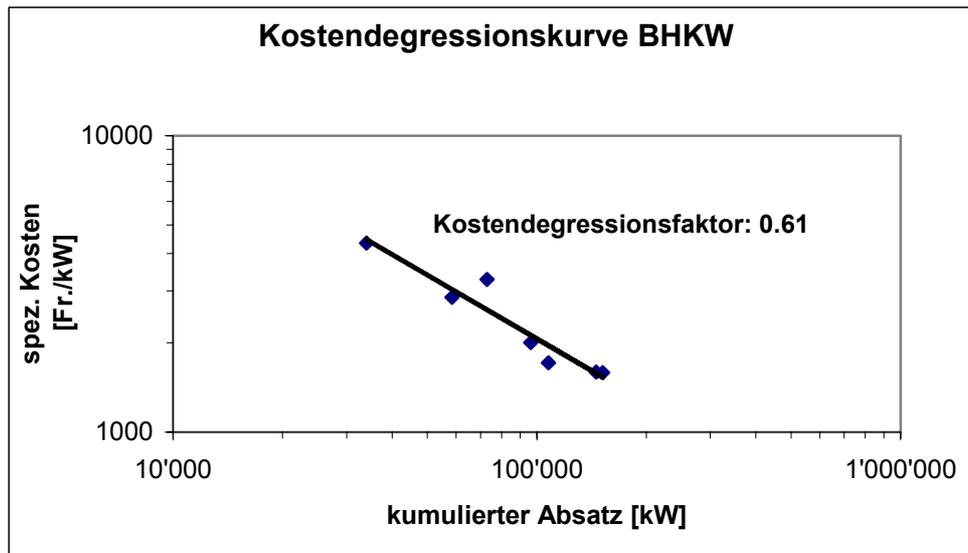
G:\2001\019\3-Bearb\[Monitoring-WKK-Ausw.xls]Tabelle1

Entwicklung der spezifischen Kosten für motorische WKK-Module

Die Modulkosten sind vor allem in der ersten Hälfte der 90er Jahre massiv gesunken. Insbesondere bei einer Leistung von 100 kW_{el} haben sich die Kosten von 1990 bis 1996 praktisch halbiert. Seit 1996 haben die Modulkosten weiter abgenommen, jedoch mit geringerem Tempo. Bei den grösseren Modulen (400 kW_{el}) kann diese Aussage aufgrund der vorhandenen Daten weitgehend gestützt werden.

Ein Unterschied zwischen Erdgas- und Diesel-BHKW kann nicht festgestellt werden, wobei Diesel-BHKW erst seit der zweiten Hälfte der 90er Jahre verstärkt angeboten werden und zum Einsatz kommen.

Zwischen 1990 und 2001 hat sich die kumulierte installierte Leistung der in der Schweiz installierten WKK-Anlagen (bis 1 MW_{el}) von 34 MW auf knapp 152 MW erhöht. Vergleicht man den kumulierten Absatz der WKK-Anlagen mit den Investitionskosten der Module so ergibt sich daraus folgende Kostendegressionskurve:



G:\2001\019\3-Bearb\[Lernkurven.xls]BHKW

Kostendegressionskurve BHKW-Module im Zeitraum 1990 bis 2001

Die Kostendegressionskurve kann durch eine Potenzfunktion $C_x/C_o = P_x^{-b}$ angenähert werden, wobei C_o für den Preis der ersten Einheit, P_x für die kumulierte Produktion und b als Konstante für den Grad der Kostensenkung steht. Als Kostendegressionsfaktor f wird die erreichbare Kostenreduktion bei Verdopplung der kumulierten Produktion bezeichnet. Es gilt $f = 2^{-b}$. Aus der oben dargestellten Kurve kann ein Kostendegressionsfaktor von 0.61 entnommen werden. Ein Vergleich mit publizierten Werten für andere Technologien zeigt, dass dieser Wert extrem tief ist, was unrealistisch hohe Lern- und Skaleneffekte voraussetzen würde. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart hat beispielsweise für die Entwicklung der Photovoltaik zwischen 1976 und 1997 in Deutschland einen Kostendegressionsfaktor von 0.78 ermittelt [9]. Die Werte für andere erneuerbare Energien werden mit 0.84 bis 0.95 angegeben.

Für die Interpretation des ermittelten Kostendegressionsfaktors von 0.61 gilt es Folgendes zu berücksichtigen:

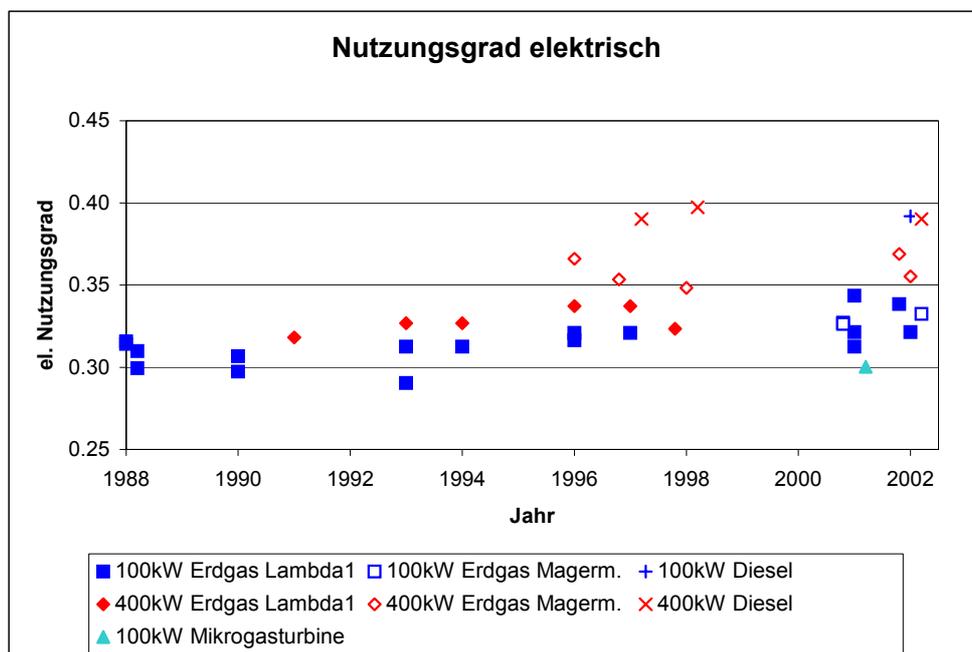
- Die Kosten beziehen sich auf die Verkaufskosten. Diese sind nicht nur abhängig von den Herstellungs- und Vertriebskosten, sondern auch von der Wettbewerbssituation.
- Der Betrachtungszeitraum für die Ermittlung des Kostendegressionsfaktors ist eher kurz, so dass die Marktsituation im Betrachtungszeitraum einen grossen Einfluss ausübt.

Wir gehen daher davon aus, dass die massive Kostenreduktion - vor allem in der ersten Hälfte der 90er Jahre - vorwiegend durch die Preispolitik der Marktteilnehmer verursacht worden ist. Zu Beginn der Markteinführung kann durch den Innovationswert eines Produktes in der Regel ein höherer Preis gelöst werden, was dazu führen kann, dass Kostensenkungen bei der Produktion nicht an die Kunden weitergegeben werden. Dies wird dann im Laufe einer breiteren Markteinführung nachgeholt, wo die Bedeutung des Preises stark steigt (siehe dazu auch [10]). Es scheint deshalb wahrscheinlich, dass bei den BHKW-Modulkosten in der ersten Hälfte der 90er Jahre Kostenreduktionen an die Abnehmer weitergegeben wurden, welche bereits früher realisiert worden sind.

Sicher haben aber 'echte' Lerneffekte die massive Kostenreduktion mit verursacht resp. erst ermöglicht:

- Kompaktbauweise: Das BHKW wird in der Werkstatt des Herstellers bis auf die externen Anschlüsse für Brennstoff, Luft und Kamin montiert und getestet. Der Aufwand auf der Baustelle kann dadurch beträchtlich reduziert werden.
- Durch den Einsatz von Magermotoren mit Turbolader konnte bei Erdgasaggregaten ab ca. 200 kW_{el} die Leistungsdichte erhöht werden. Dies ermöglicht bei vergleichbarer Leistung den Einsatz kleinerer und somit günstigerer Motoren.

Nutzungsgrad elektrisch



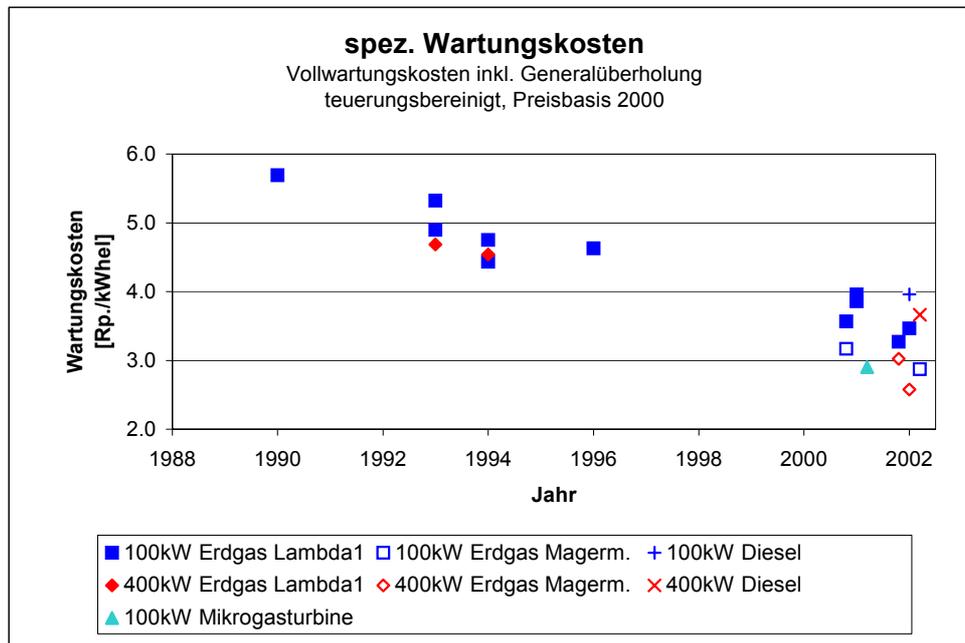
G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WKK-Ausw.xls]Tabelle1

Entwicklung des elektrischen Nutzungsgrades für motorische WKK-Module

Während bei Diesel-BHKW der elektrische Nutzungsgrad scheinbar auf hohem Niveau konstant geblieben ist, kann für Erdgas-BHKW im Betrachtungszeitraum in beiden betrachteten Leistungsklassen eine deutliche Verbesserung festgestellt werden. Diese kann auf folgende Faktoren zurückgeführt werden:

- Durch die laufende Optimierung der Anlagen bei an sich gleichbleibender Technologie konnte eine kontinuierliche Verbesserung des elektrischen Nutzungsgrades um ca. 10 % erreicht werden.
- Ein eigentlicher Technologiesprung hat mit der Einführung von Magermotoren mit SCR-Katalysator stattgefunden, welche sich bei WKK-Modulen ab ca. 250 kW_{el} gegenüber den Lambda-1-Motoren durchgesetzt haben. Im Leistungsbereich von 400 kW_{el} hat die Einführung der Magermotoren eine Erhöhung des elektrischen Nutzungsgrades um gut 5 % bewirkt (zusätzlich zur oben erwähnten Optimierung). Bei den WKK-Modulen mit 100 kW_{el} werden Magermotoren mit SCR-Katalysatoren erst seit kurzer Zeit angeboten und verfügen über keinen signifikant besseren Nutzungsgrad wie Lambda-1-Motoren. Dieser Unterschied dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei den grösseren Motoren speziell für Stationärmotoren entwickelte Turbolader zum Einsatz gelangen, welche eine höhere Aufladung des Motors ermöglichen.

Wartungskosten



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WKK-Ausw.xls]Tabelle1

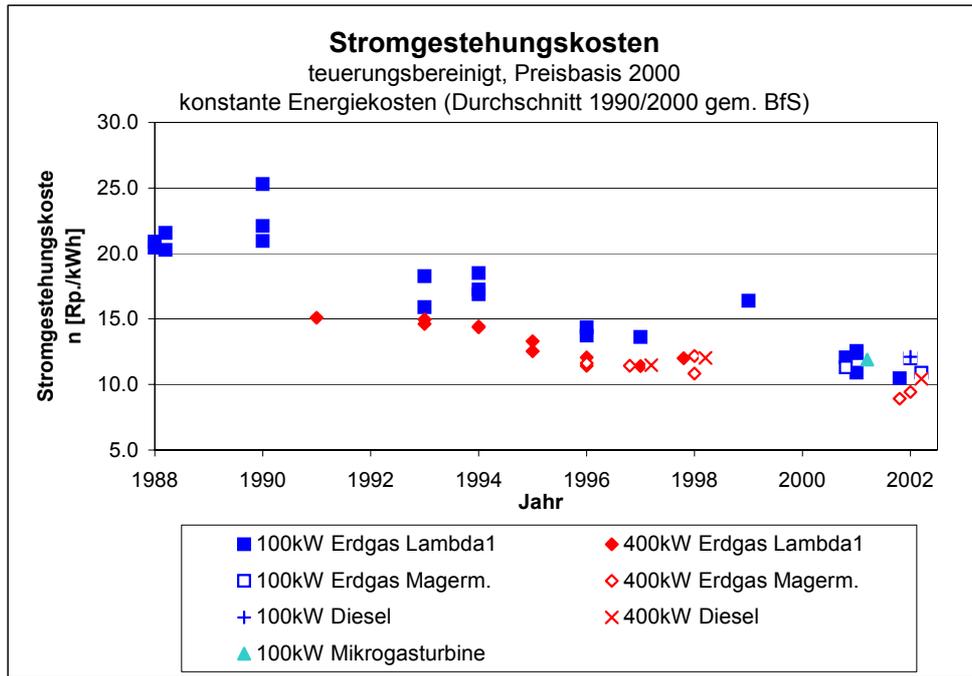
Entwicklung der spezifischen Wartungskosten für motorische WKK-Module

Bei den Wartungskosten konnten nur relativ wenig brauchbare Zahlen eruiert werden. Offensichtlich wurde lange Zeit mit unrealistisch tiefen Wartungskosten gerechnet. So wurden bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen bis Mitte der 90er Jahre in der Regel lediglich die Kosten von Serviceverträgen mit 5jähriger Laufzeit eingerechnet und somit die Kosten für eine Generalüberholung und oft auch die notwendigen Ersatzteile nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. Erst seit wenigen Jahren werden von den Herstellern umfassende Vollwartungskosten angegeben und entsprechend offeriert.

Dies soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Wartungskosten tatsächlich zwischen 1990 und 2000 um über 30 % gesunken sind, was auch durch Aussagen der Fachspezialisten bestätigt wird. Folgende Faktoren haben diese Entwicklung ermöglicht:

- Die Störanfälligkeit der Module konnte wesentlich verbessert werden, so dass heute kaum noch störungsbedingte Serviceeinsätze einkalkuliert werden müssen.
- Wie weiter oben bereits erwähnt, konnte beim Erdgas durch den Einsatz von Magermotoren mit Turbolader bei Aggregaten ab ca. 200 kW_{el} die Leistungsdichte erhöht werden. Dies ermöglicht bei vergleichbarer Leistung den Einsatz kleinerer Motoren mit entsprechend geringerem Wartungsaufwand.

Entwicklung der Stromgestehungskosten

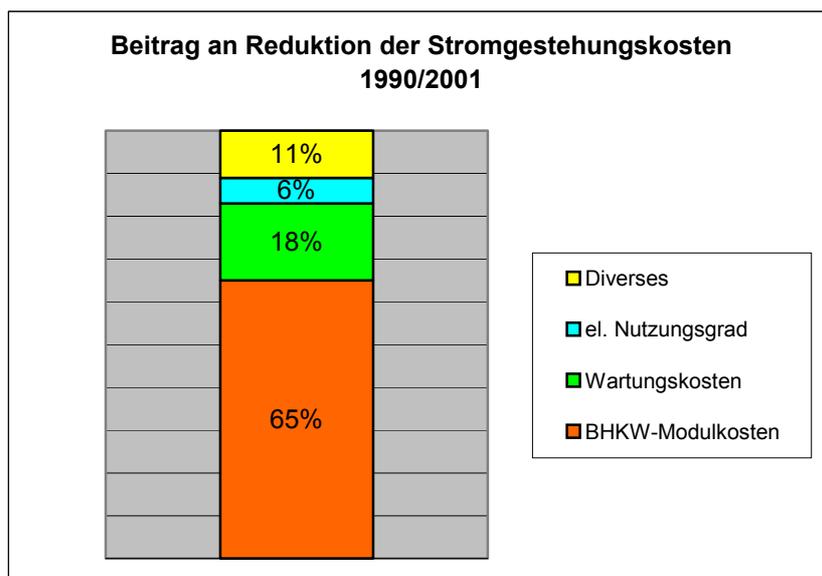


G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WKK-Ausw.xls]Tabelle1

Teuerungsbereinigte Entwicklung der Stromgestehungskosten für motorische WKK-Module unter Annahme konstanter Energiepreise

Die Darstellung zeigt die Stromgestehungskosten unter der Annahme von konstanten Energiekosten (entsprechend den durchschnittlichen Kosten im Zeitraum 1990 bis 2000 gem. BfS). Für die untersuchten motorischen WKK-Anlagen sind die Stromgestehungskosten aufgrund der gesunkenen Modul- und Wartungskosten sowie des verbesserten elektrischen Nutzungsgrades zwischen 1990 und 2000 um ca. 40 % gesunken sind.

Die folgende Darstellung zeigt den Anteil der einzelnen Faktoren an der Reduktion der Stromgestehungskosten am Beispiel für Erdgas-BHKW mit 100 kW elektrischer Leistung.

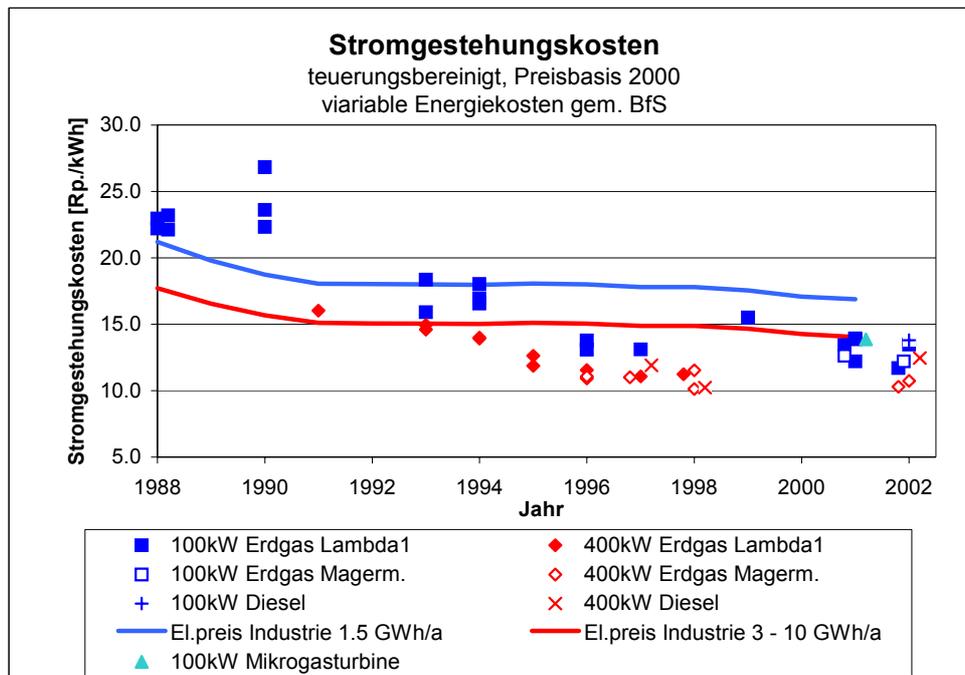


G:\2000\005\BFE\BE-Zwischenbericht-1.xls]Tabelle1

Einfluss der untersuchten Monitoring-Faktoren an die Reduktion der Stromgestehungskosten im Zeitraum 1990/2000 für motorische WKK-Anlagen

Unter 'Diverses' ist die dem Berechnungsmodell zugrunde gelegte Reduzierung der Kosten für die Einbindung des BHKW (inkl. Spitzenkessel und bauliche Massnahmen) zu verstehen. Die Reduktion wurde aufgrund des Zürcher Wohnbaukostenindex [8] berechnet.

Um die Konkurrenzfähigkeit am Markt darzustellen, werden in der folgenden Grafik die Stromgestehungskosten auf der Basis variabler Energiekosten (gem. BfS) dargestellt. Zusätzlich sind die Bezugskosten für Elektrizität als wichtigste Konkurrenz zu einer Eigenstromerzeugung mit WKK-Anlagen eingetragen.



G:\2001\019\3-Bearb\[Monitoring-WKK-Ausw.xls]Tabelle1

Teuerungsbereinigte Entwicklung der Stromgestehungskosten für motorische WKK-Module bei effektivem Verlauf der Energiepreise

Ein Vergleich mit der Darstellung mit konstanten Energiepreisen (siehe weiter oben) zeigt vor allem ab dem Jahr 2000 deutliche Unterschiede. Durch die stark gestiegenen Preise für fossile Energieträger werden die Stromgestehungskosten erhöht. Dies bewirkt, dass die anhaltenden technologischen Fortschritte (sinkende Modul- und Wartungskosten; steigender el. Nutzungsgrad) praktisch kompensiert werden und die Stromgestehungskosten für neue WKK-Anlagen seit 1996 nahezu konstant geblieben sind.

Trotz den schwierigeren Rahmenbedingungen liegen die Stromgestehungskosten in den untersuchten Leistungsklassen seit ca. 1994 tiefer wie die entsprechenden Bezugskosten für Elektrizität.

Zusammengefasst können für die Stromgestehungskosten und die Monitoring-Faktoren folgende Eckwerte festgehalten werden:

	1990	1995	2000
100kW_{el}			
Stromgestehungskosten [Rp./kWh] ¹⁾	24	15	12
Modulkosten [Fr./kW]	4'000	2'750	1'600
Nutzungsgrad el. [%] – Erdgas – Diesel	30 -	31.5 -	33 38
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}] – Erdgas – Diesel	5.5 -	4.5 -	3.5 4.2
400kW_{el}			
Stromgestehungskosten [Rp./kWh]	16	13	10
Modulkosten [Fr./kW]	2'500-3'000	1'800	1'100
Nutzungsgrad el. [%] – Erdgas – Diesel	32 -	34 -	36 39
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}] – Erdgas – Diesel	- -	4.25 -	3.0 3.7

Alle Kostenangaben sind teuerungsbereinigt (Preisbasis 2000)

1) Stromgestehungskosten auf Basis der effektiven Energiepreise in den entsprechenden Jahren

Tabelle 15 Ermittelte Werte 1990/2000 für motorische WKK-Anlagen

3.4 Künftige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Faktoren

BHKW-Modulkosten

Während die Kostensenkungspotenziale durch Kompaktbauweise in den 90er Jahren weitgehend erschöpft worden sind, bestehen für eine weitere Senkung der Investitionskosten für BHKW-Module vor allem noch folgende Spielräume:

- Weitere Erhöhung der Leistungsdichte, welche mit einer höheren Aufladung erzielt werden kann.
- Weitere Standardisierung und Rationalisierung bei der Zusammenstellung der BHKW-Module.

Njtsch/Dienhart erwähnen in [4] Kostensenkungspotenziale von 20 % bei kleineren und mittelgrossen Aggregaten durch weitere Standardisierung und Rationalisierung.

Im Folgenden wird versucht, die künftige Entwicklung der Investitionskosten anhand vorhandener Prognosen der quantitativen Entwicklung und der weiteren Entwicklung der Kostendegressionsfaktoren abzuschätzen.

Es ist offensichtlich, dass die quantitative Entwicklung der Wärmekraftkopplung sehr stark von den äusseren Rahmenbedingungen abhängt. Entsprechend rechnet Cogen Europe [11] bis 2010 je nach Szenario mit einem Wachstum der installierten WKK-Kapazität von 80 % (Szenario 'post Kyoto'), 24 % ('heightened environmental awareness'), 10 % ('present policies') oder -6 % ('deregulated liberalisation').

In der Schweiz scheint der weitere Verlauf der Entwicklung um einiges unsicherer. Er hängt insbesondere von der Strommarktliberalisierung, der Einführung einer CO₂-Abgabe, dem Ausgang der Abstimmungen über einen Ausstieg aus der Kernenergie sowie natürlich von den Preisen für fossile Energieträger ab.

Zu berücksichtigen sind zudem ein zunehmender Ersatz von alten BHKW (in der Schweiz sind bis 2010 ca. 2/3 der heute in Betrieb stehenden Anlagen älter wie 15 Jahre) sowie die Konkurrenzierung der motorischen Wärmekraftkopplung durch Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen.

Da sich die Preise für BHKW in der Schweiz in jedem Fall stark am europäischen Niveau orientieren dürften, wird die künftige Preisentwicklung auf der Basis des Wachstums der installierten WKK-Kapazität in Europa berechnet. Der kumulierte Absatz von motorischen BHKW würde demnach bis 2010 zwischen 60 und 140 % gegenüber dem heutigen Stand zunehmen (inkl. Ersatz älterer Anlagen).

Zusätzlich muss ein Marktanteil für Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen berücksichtigt werden. Welches Ausmass dieser Marktanteil bis 2010 bereits annehmen wird, ist zum heutigen Zeitpunkt kaum abzuschätzen. Auch wenn sich die neuen WKK-Technologien sehr dynamisch entwickeln und die motorische WKK ab 2005 innerhalb weniger Jahre ganz verdrängen, so steigt der Marktanteil der neuen Technologien für den Zeitraum 2000 bis 2010 kaum über 30 %. Wir nehmen für Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen zusammen einen Marktanteil von 10 bis 30 % an, wodurch sich die Zunahme des kumulierten Absatzes von motorischen BHKW bis 2010 auf ca. 55 bis 100 % reduziert.

Vorsichtig beurteilt kann angenommen werden, dass nach der sehr dynamischen Entwicklung der letzten 10 Jahre die Preise nur noch verlangsamt sinken. Orientiert man sich an einer statistischen Auswertung von Kostendegressionsfaktoren in vergleichbaren Branchen (Maschinen-, Elektronik-, Automobilbranche, etc. siehe [10]), erscheint ein Kostendegressionsfaktor von 0.9 unter diesen Umständen als eher pessimistische Einschätzung.

Auch bei einer optimistischen Beurteilung kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Preise weiterhin gleich stark sinken, wie in den vergangenen 10 Jahren. Die Preise für BHKW-Module liegen heute nur noch geringfügig über dem Niveau in Deutschland, wo durch die Strommarktliberalisierung ein äusserst starker Kostendruck besteht. Unter der Voraussetzung, dass weiterhin ein genügend grosser Markt existiert und eine Konkurrenzierung durch Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen langsam zunimmt, wird als obere Grenze ein Kostendegressionsfaktor von 0.75 angenommen.

Aus den genannten Annahmen betreffend Marktvolumen und Kostendegressionsfaktoren ergibt sich bis 2010 eine Preisreduktion für BHKW-Module zwischen 6 bis 25 %.

Nutzungsgrad elektrisch

Eine weitere Erhöhung der elektrischen Nutzungsgrade in den nächsten 10 Jahren scheint durchaus wahrscheinlich. Neue Ansätze (z.B. durch ETH-Gasmotor mit Abgasturbolader und gekühlter Abgasrückführung oder durch höhere Druckverhältnisse mit neuen Einspritztechnologien bei Dieselmotoren) können auch bei grösseren Maschinen eine weitere Steigerung des elektrischen Nutzungsgrads ermöglichen. Ob sich der zusätzliche Aufwand auch bei kleineren Aggregaten (unter ca. 150 kW_{el}) lohnt, muss sich noch weisen.

Die Obergrenzen für den elektrischen Nutzungsgrad liegen gemäss Njtsch/Dienhart [4] für Erdgasmaschinen bei 45 % resp. für Dieselmotoren bei 48 %.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen eine Übersicht der erwähnten Werte und die daraus abgeleiteten Annahmen für den Stand des elektrischen Nutzungsgrades im Jahre 2010.

Erdgas		100 kW_{el}	400 kW_{el}
Ergebnisse Analyse bisherige Entwicklung	Zustand 1990	30 %	32 %
	Zustand 2000	33 %	36 %
DIMAG [8]	Messdaten 2001 Swissmotor AGR	38 % (190 kW _{el})	
Njtsch/Dienhardt [4]	langfristige Obergrenze (Magermotoren)	45 % (ohne Leistungsangabe)	
Annahmen 2010		35 - 37 %	39 - 41 %

Diesel		100 kW_{el}	400 kW_{el}
Ergebnisse Analyse bisherige Entwicklung	Zustand 2000	38 %	39 %
	Njtsch/Dienhardt [4]	langfristige Obergrenze	48 %
Annahmen 2010		40 - 42 %	41 - 43 %

Tabelle 16 Abschätzung der künftigen Entwicklung des elektrischen Nutzungsgrades

Wartungskosten

Auch bei den Wartungskosten scheint eine weitere Reduktion durchaus wahrscheinlich. Neben den Fortschritten wie sie auch bei Verbrennungsmotoren für mobile Anwendungen erreicht werden, wirkt sich auch die zunehmende Anlagendichte durch kürzere Anfahrtswege positiv aus. Für die Stadt Frankfurt am Main liegen die Wartungskosten gemäss [5] heute deutlich unter den Preisen in der Schweiz.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht der erwähnten Werte und die daraus abgeleiteten Annahmen für den Stand der Wartungskosten im Jahre 2010.

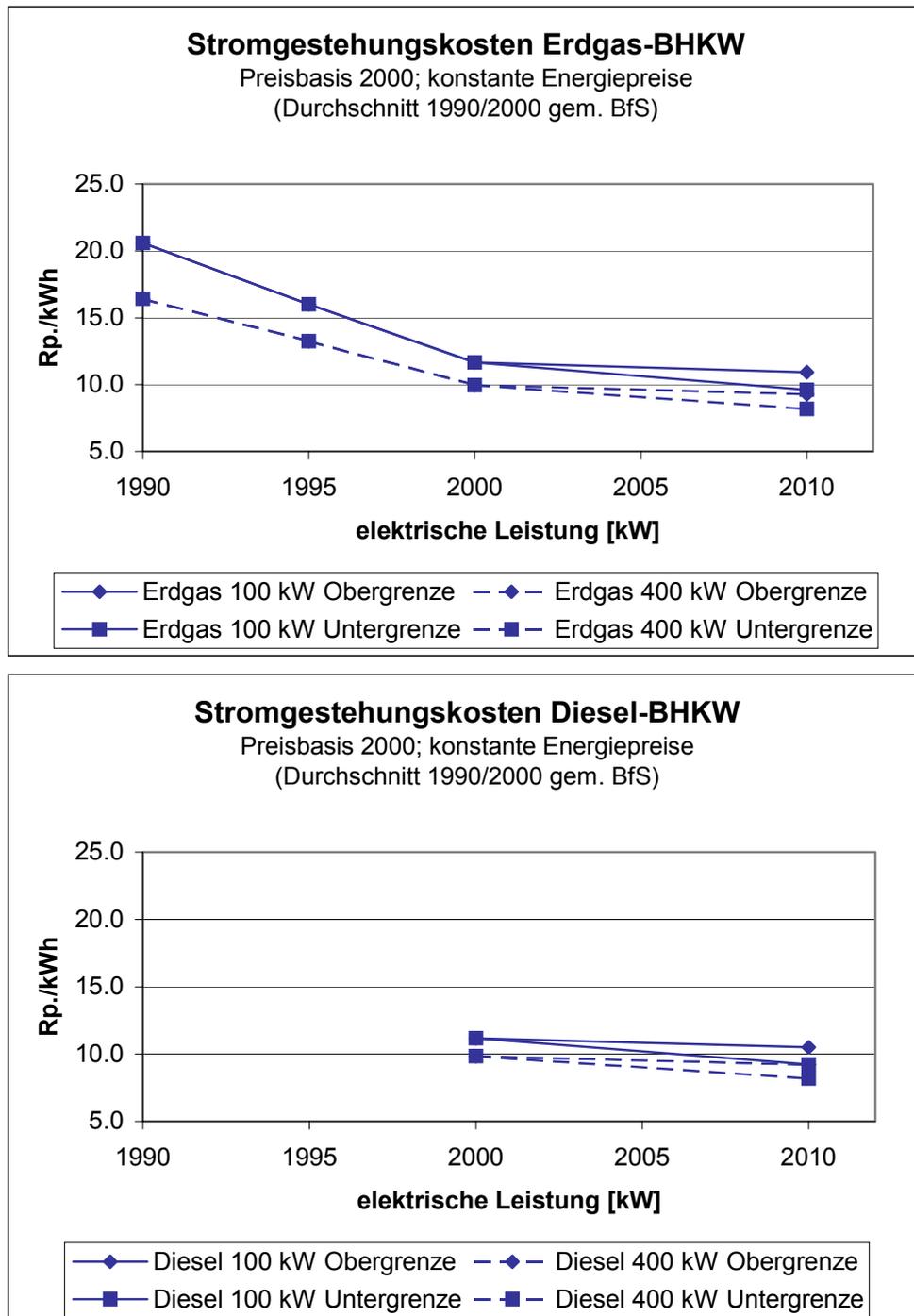
Wartungskosten [Rp./kWh_{el}]	1990	1995	2000	2000 D*	2010
100 kW_{el}					
- Erdgas	5.5	4.5	3.5	2.5	2.5 - 3.0
- Diesel	-	-	4.2	-	3.2 - 3.7
400 kW_{el}					
- Erdgas	-	4.25	3.0	1.9	2.0 - 2.5
- Diesel	-	-	3.7	-	2.7 - 3.2

* Preise in Deutschland für die Stadt Frankfurt [5]

Tabelle 17 Abschätzung der künftigen Entwicklung der Wartungskosten

Entwicklung der Stromgestehungskosten

Die folgenden Darstellungen zeigen die weitere Entwicklung der Stromgestehungskosten für Erdgas- und Diesel-BHKW, welche sich aus den Annahmen betreffend Investitionskosten, elektrischem Nutzungsgrad und Wartungskosten ergeben. Die Energiepreise werden als konstant angenommen.



G:\2001\019\3-Bearb\[Monitoring-WKK-zukunft-b.xls]Ergebnisse

Künftige Entwicklung der Stromgestehungskosten bei konstanten Energiepreisen

Aus der Darstellung für Erdgas-BHKW wird deutlich, dass in den kommenden 10 Jahren die Stromgestehungskosten wohl deutlich langsamer sinken werden, wie in den 90er Jahren. Diese Prognose be-

ruht auf der Annahme, dass sich bei den Investitionskosten der Preiszerfall nicht im gleichen Masse fortsetzt.

3.5 Fazit

Für die bisherige und die künftige Entwicklung der motorischen Wärmekraftkopplung wurden folgende Werte ermittelt:

	1990	1995	2000	2010
WKK motorisch 100 kW_{el}				
Modulkosten [Fr.]	4'000	2'750	1'600	1'300 - 1'500
Nutzungsgrad el. [%]				
- Erdgas	30	31.5	33	35 - 37
- Diesel	-	-	38	40 - 42
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]				
- Erdgas	5.5	4.5	3.5	2.5 - 3.0
- Diesel	-	-	4.2	3.2 - 3.7
Stromgestehungskosten ¹⁾	24	15	12	9 - 11
WKK motorisch 400 kW_{el}				
Modulkosten [Fr.]	2'500 - 3'000	1'800	1'100	900 - 1'000
Nutzungsgrad el. [%]				
- Erdgas	32	34	36	39 - 41
- Diesel	-	-	39	41 - 43
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]				
- Erdgas	-	4.25	3.0	2.0 - 2.5
- Diesel	-	-	3.7	2.7 - 3.2
Stromgestehungskosten ¹⁾	17	13	12	8 - 9

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für jeweils spezifische Rahmenbedingungen.

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 18 Ermittelte Werte motorische Wärmekraftkopplung

Die Stromgestehungskosten für BHKW sind in den untersuchten Leistungsbereichen (100/400 kW_{el}) zwischen 1990 und 2000 drastisch gesunken (40 %) und liegen seit Mitte der neunziger Jahre unter den Bezugskosten für Elektrizität. Die Statistik zeigt, dass sich dies unmittelbar auf die quantitative Entwicklung der Wärmekraftkopplung ausgewirkt hat.

Die Reduktion der Stromgestehungskosten in den 90er Jahren kann zum überwiegenden Teil auf den Preiszerfall der BHKW-Module zurückgeführt werden. Neben technologischen Faktoren (Kompaktbauweise und Magermotortechnologie) wurde dieser Preiszerfall schwergewichtig durch die Preispolitik der Anbieter ermöglicht. Dabei liegt die Vermutung nahe, dass die Preise in der Schweiz in der ersten Hälfte der 90er Jahre an das europäische Niveau angeglichen wurden, welchem sie heute in etwa entsprechen.

Für die Zukunft ist unter Annahme von konstanten Energiepreisen eine weitere Reduktion der Stromgestehungskosten zu erwarten, bei allerdings deutlich langsamerem Tempo. Der tatsächliche Verlauf und damit auch allfällige Auswirkungen auf den WKK-Markt werden allerdings stark von den Energiepreisen abhängig bleiben.

4 Brennstoffzellen

4.1 Marktsituation

Grössen der Brennstoffzellensysteme

Brennstoffzellen für die Wärmekraftkopplung werden vor allem für folgende Bereiche entwickelt:

- WKK-Module für Ein- bis Mehrfamilienhäuser oder kleinere Gewerbeliegenschaften mit einer thermischen Leistung inkl. Zusatzbrenner unter 50 kW. Die elektrische Leistung liegt beim aktuellen Stand der Technik unter 10 kW. Diese Anlagen dringen in einen Bereich vor, in welchem motorische WKK-Anlagen bisher praktisch nicht Fuss fassen konnten.
- WKK-Module mit einer thermischen Leistung ab ca. 50 kW für grössere Einzelobjekte oder kleinere Nahwärmenetze. Die Module stehen in direkter Konkurrenz zu motorischen WKK-Modulen.
- WKK-Anlagen für grössere Wärmenetze resp. Kraftwerke mit einer thermischen Leistung ab ca. 1 MW.

Bei der Brennstoffzellentechnologie kann davon ausgegangen werden, dass die spezifischen Kosten weniger stark von der Anlagengrösse abhängig sind, wie dies bei motorischen WKK-Anlagen der Fall ist. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass sich die Brennstoffzellen im unteren Leistungsbereich, wo die spezifischen Kosten von motorischen WKK-Anlagen um Fr. 5'000.--/kW liegen, eher durchsetzen können wie im mittleren Leistungsbereich (spez. Kosten motorische WKK: Fr. 800 bis Fr. 2'000.--/kW_{el}). Dieser unterste Leistungsbereich ist zusätzlich von spezieller Bedeutung, weil damit ein neues Marktpotenzial für die Wärmekraftkopplung erschlossen werden kann und mit Sulzer Hexis die Schweiz bei den Herstellern stark vertreten ist. Kritisch im kleinen Bereich sind aber die Wartungskosten, da ein einmaliger jährlicher Service ohne Verbrauchsmaterial und Ersatzteile bereits zu Kosten von mindestens 6 Rp./kWh führt (Annahmen: Kosten Fr. 500.--; elektrische Leistung 2 kW; 4'000 Betriebsstunden pro Jahr).

Im Folgenden wird der Leistungsbereich bis 10 kW_{el} näher untersucht.

Übersicht Brennstoffzellensysteme bis 10 kW_{el}

In Europa werden derzeit drei Brennstoffzellensysteme entwickelt und im Rahmen von Feldtests resp. Vorserien eingesetzt. Der aktuelle Stand ist in der folgenden Tabelle festgehalten.

	Sulzer Hexis	Plug Power/ Vaillant	European Fuel Cell GmbH
BZ - Typ:	SOFC	PEM	PEM
Brennstoff	Erdgas	Erdgas	Erdgas
Systemaufbau (Vorseriengeräte)	Kompaktgerät inkl. Pufferspeicher + Zusatz- heizgerät	BZ-Einheit; Zusatzheiz- gerät und WW-Speicher separat	Kompaktgerät inkl. Speicher + Zusatzbren- ner
th. Leistung inkl. Zusatzbrenner:	14.5, 18.5 oder 24.5 kW	ca. 30 - 55 kW	8 kW
th. Leistung BZ: ¹⁾	2.5 kW	7 kW	?
el. Leistung: BZ: ¹⁾	1 kW	4.6 kW	1.5 kW

	Sulzer Hexis	Plug Power/ Vaillant	european fuel cell gmbh
Feldtests:	1998 - 2001 6 Anlagen	2001 - 2003 3 + 50 Anlagen	1999 - 2001 4 Anlagen
Vorserie:	2001 - 2004 400 Anlagen	2002 - 2004 400 Anlagen	2002 - 2003 100 Anlagen
Serienproduktion:	ab 2004/05	ab 2004	?

Tabelle 19 Übersicht Brennstoffzellenheizgeräte auf dem europäischen Markt

Bis jetzt werden von den aufgeführten Systementwicklern keine konkreten Kosten bekannt gegeben. Die bisher vor allem von Sulzer Hexis vertriebenen Vorserien-Brennstoffzellengeräte werden den Endkunden von den Vertriebspartnern im Contracting zur Verfügung gestellt. Die vorhandenen Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Energieerzeugung werden von Sulzer Hexis und den Vertriebspartnern übernommen. Angaben über die momentanen Investitionskosten der Brennstoffzellengeräte sind nicht zugänglich.

Für die wichtigsten technischen Daten (z.B. elektrischer Nutzungsgrad) werden zwar Werte genannt, jedoch handelt es sich dabei nicht um gesicherte Werte, sondern viel mehr um erste Messergebnisse über zeitlich beschränkte Messperioden.

Es ist offensichtlich, dass unter diesen Umständen zum jetzigen Zeitpunkt noch kein detailliertes Technologie-Monitoring möglich ist. Im Folgenden werden der Entwicklungsstand und die Ziele von Sulzer Hexis und Vaillant/Plug Power beschrieben und diskutiert. Damit soll ein erster Grundstein gelegt werden, um die Entwicklung und die damit verbundenen Lernprozesse zu verfolgen. Sobald die Brennstoffzellengeräte kommerziell angeboten werden (nach bisherigem Stand ab 2004/05), kann mit einem umfassenden Monitoring begonnen werden.

Sulzer Hexis

Sulzer scheint mit der Hexis Brennstoffzelle am weitesten fortgeschritten zu sein. In den Jahren 1998 - 2001 wurden mit 6 Feldtestanlagen total über 85'000 Betriebsstunden erreicht.

Ein Vorseriensystem (HXS 1000 Premiere) wird in den Jahren 2001 bis 2004 insgesamt etwa 400 mal installiert. Sulzer Hexis hat dazu bereits für sämtliche 400 Systeme Vertriebsvereinbarungen mit Energieversorgungsunternehmen vor allem aus Deutschland abgeschlossen. Erst kürzlich (August 2002) wurde die Vertriebsvereinbarung mit der Gasverbund Mittelland AG (GVM) über 30 Geräte bekannt gegeben.

Als Brennstoff wird derzeit nur Erdgas eingesetzt. Entwicklungsarbeiten für Biogas und Heizöl sind aber bereits im Gange. Bei ersterem sind bereits Feldtests abgeschlossen worden. In den nächsten Jahren werden in Kooperation mit ARAL Betriebsversuche mit verschiedener Heizölqualitäten an einem speziellen Prototyp-Brennstoffzellengerät durchgeführt.

Vaillant/Plug Power

Vaillant arbeitet für die Entwicklung eng mit Plug Power zusammen. Bei Plug Power lagen bis Mitte 2001 kumuliert über 180'000 Stunden Betriebserfahrung mit Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen vor. Vom gemeinsam für den europäischen Markt entwickelten Brennstoffzellenheizgerätes wurden bis Mitte 2002 drei Feldtestgeräte installiert. Ende 2002 soll eine weitere dreijährige Felderprobung mit 52 Geräten starten, welche in Deutschland und Holland installiert werden und über eine spezielle Kommunikation als virtuelles Kraftwerk betrieben werden. Dazu wurde bereits ein Konsortium mit 10 Partnern aus Energiewirtschaft und Forschung gegründet.

Beim Brennstoff konzentriert sich Vaillant bisher auf Erdgas.

4.2 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell entspricht grundsätzlich demjenigen der motorischen Wärmekraftkopplung.

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring zu analysieren sind, ist aufgrund der momentan verfügbaren Daten noch nicht möglich. Im Folgenden werden deshalb mit Ausnahme der Hilfsenergiekosten und der Versicherungskosten sämtliche Faktoren behandelt.

Der Hilfsenergieverbrauch für die Heizungspumpe unterscheidet sich nicht von einer konventionellen Heizungsanlage. In welcher Form Risikokosten resp. Versicherungskosten bei Kleinanlagen anfallen und wie diese gedeckt werden, wird sich noch zeigen müssen. Es ist allerdings kaum zu erwarten, dass wie bei grossen Anlagen eine Maschinenbruchversicherung abgeschlossen wird.

4.3 Aktueller Stand

Technisch/wirtschaftliche Faktoren

Investitionskosten

Wie bereits erwähnt, werden von den Systementwicklern keine konkreten Zahlen betreffend den Investitionskosten der Brennstoffzellenheizgeräte genannt. Es ist jedoch klar, dass durch die geringen Stückzahlen die Herstellungskosten heute um weites über dem Mass liegen, welches für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendig wäre.

Brennstoffzellenmodule im Leistungsbereich von 200 kW_{el} sind bereits kommerziell verfügbar (ONSI). Die Verkaufskosten liegen heute bei ca. Fr. 8'000.--/kW. Für motorische WKK-Anlagen sind die spezifischen Kosten im untersten Leistungsbereich (5 kW_{el}) heute ca. 5-mal höher wie bei 200 kW_{el}. Für Brennstoffzellen wird bei entsprechendem Entwicklungsstand erwartet, dass die spezifischen Kosten weniger stark von der Anlagengrösse abhängig sind, wie dies bei motorischen WKK-Anlagen der Fall ist. Dies dürfte allerdings heute noch nicht der Fall sein. Erfahrungsgemäss ist in frühen Entwicklungsstadien von einer eher grösseren Abhängigkeit der Kosten von der Anlagengrösse auszugehen, da Kostendegressionseffekte durch hohe Stückzahlen, welche für kleine Geräte weit wichtiger sind als für grosse Anlagen, noch nicht wirken. Als grobe Schätzung wird daher angenommen, dass die Kosten für Brennstoffzellenheizgeräte unter 10 kW_{el} heute im Bereich von Fr. 40'000.-- bis Fr. 100'000.--/kW_{el} liegen.

Nutzungsgrad Wärme/Strom

Im Gegensatz zu motorischen WKK-Anlagen wird der maximal erreichbare elektrische Wirkungsgrad bei Brennstoffzellen-Systemen nicht durch den Carnot-Faktor begrenzt. Daher können theoretisch elektrische Wirkungsgrade von 70 - 80 % erzielt werden. Im Betrieb ist der elektrische Wirkungsgrad u.a. durch ohmsche Verluste im Elektrolyten deutlich niedriger.

Phosphorsaure ONSI Zellen erreichen heute elektrische Wirkungsgrade im Neuzustand von knapp über 40%. Diese sinken im Laufe der Zeit auf unter 35%, so dass kein Vorteil mehr gegenüber Magermotoren resultiert. Die Gesamtnutzungsgrade hängen sehr stark von der Temperatur der Wärmeabgabe ab. Bei sehr tiefen Rücklauftemperaturen können jahresnutzungsgrade von ca. 75% erreicht werden (konv. WKK Anlagen 90%), bei etwas erhöhten Rücklauftemperaturen sinken die Werte noch weiter ab. Phosphorsaure Zellen sind daher für die Wärmekraftkopplung wenig geeignet.

Für die SOFC-Brennstoffzelle von Sulzer Hexis soll bei Nennleistung der Gesamtwirkungsgrad derzeit bei 85 % liegen, der elektrische Wirkungsgrad bei 25 - 30 %. Es ist davon auszugehen, dass es sich dabei um kurzfristige Spitzenwerte handelt. Wenig bekannt sind elektrischer und thermischer Jahresnutzungsgrad, doch dürften die Jahresnutzungswerte noch tiefer als diejenigen vergleichbarer Motoren (vor allem thermisch) liegen. Wenig öffentlich bekannt sind auch Auswirkungen des Taktens, welches bei wärmegeführten WKK-Anlagen unausweichlich ist.

Niedertemperaturbrennstoffzellen wie die PEM-BZ von Vaillant erreichen generell tiefere Nutzungsgrade wie Hochtemperaturbrennstoffzellen (z.B. SOFC). Heute weisen grosse Module mit PEM-Brennstoffzellen einen elektrischen Nutzungsgrad von knapp 35 % und einen Gesamtnutzungsgrad von knapp 75 % auf.

Für den aktuellen Stand für kleine Brennstoffzellenheizgeräte scheinen folgende Nutzungsgrade realistisch:

	Hochtemperatur-BZ (SOFC)	Niedertemperatur-BZ (PEM)
el. Nutzungsgrad	20 - 30 %	20 - 30 %
Gesamtnutzungsgrad	60 - 80 %	50 - 70 %

Tabelle 20 Geschätzte aktuelle Jahresnutzungsgrade von Brennstoffzellenheizgeräten

Nutzungsdauer

Betreffend der zu erwartenden Lebensdauer der BZ-Systeme sind erst wenige Daten verfügbar.

Angestrebt wird eine Lebensdauer von 15 Jahren (resp. 60'000 h) wie sie von haustechnischen Anlagen üblicherweise erreicht wird. Beim Zellstapel kann dieses Ziel in den nächsten Jahren nicht erreicht werden. Es wird davon ausgegangen, dass dieser während der Lebensdauer des Gesamtsystems mehrfach ausgewechselt werden muss. Die entsprechenden Kosten werden deshalb unter den Wartungskosten berücksichtigt.

Für die übrigen Komponenten des Brennstoffzellensystems (Gasaufbereitung, Zusatzheizgerät, Wärmetauscher, Wechselrichter, Steuerung) wird von einer Lebensdauer von 15 Jahren ausgegangen.

Wartungskosten

Potenziell ist die Brennstoffzelle durch das Fehlen von beweglichen Teilen wesentlich wartungsärmer wie ein Verbrennungsmotor.

Wie im obigen Abschnitt erwähnt, weisen die Zellstapel eine noch sehr kurze Lebenserwartung auf. Als langfristiges Ziel wird z.B. bei Sulzer Hexis eine Lebensdauer von 5 Jahren angestrebt.

Wird davon ausgegangen, dass die Kosten eines Zellstapels ca. ein Drittel des gesamten BZ-Gerätes betragen, so resultieren derzeit noch astronomische Wartungskosten von mehreren Franken pro Kilowattstunde produzierter Elektrizität.

Stromgestehungskosten

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums, welches sich vor allem durch enorme Investitions- und Wartungskosten ausdrückt, erscheint eine Berechnung der aktuellen Stromgestehungskosten nicht als sinnvoll.

4.4 Künftige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Faktoren

Investitionskosten

Ausgehend von den Vorseriengeräten besteht noch ein umfangreiches Entwicklungspotenzial, um mit den Seriengeräten die Kosten drastisch zu reduzieren. Bei der Entwicklung der Seriengeräte werden u.a. folgende Richtungen verfolgt:

- Vereinfachte Verfahrenstechnologie zur Gasreformierung (z.B. Verfahren der 'partiellen Oxidation' anstelle der katalytischen Dampfreformierung bei Sulzer Hexis)
- Optimierung des Aufbaus des Zellstapels
- Verbesserte Materialtechnologie (z.B. bei Hexis, um auf die heute noch notwendige Entschwefelung des Erdgases verzichten zu können).
- Vereinfachung der Systemkomplexität durch weitere Systemintegration
- Verbilligte Produktion durch höhere Stückzahlen (u.a. auch dadurch, dass künftig MassenhHersteller als Zulieferer für Wechselrichter, Brenner, etc. eingebunden werden)

Als Kostenziel, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen, nennen die Systementwickler Mehrkosten gegenüber konventionellen Gasheizgeräten von etwa Fr. 3'000.-- /kW_{el}. Diese Kostenziele sollen bis zur breiten Vermarktung erreicht werden. Zu Beginn der Markteinführung dürften die Preise noch höher liegen und sich die Angebote somit an Pionierkunden (resp. „first mover“) richten.

Wie bereits erwähnt geben die Systementwickler kaum Absatzziele öffentlich bekannt. Immerhin erwähnt ein Entwickler bis 2010 eine Produktion von 100'000 Geräten jährlich für den europäischen Markt. Insgesamt gehen wir nach eignen Schätzungen davon aus, dass die Systementwickler bis 2010 weltweit ein Marktvolumen von 200'000 bis 500'000 Geräten pro Jahr anstreben. Bezogen auf die USA und Europa, auf welche sich die Markteinführung wohl konzentrieren wird, entspräche dies einem Marktanteil von 3 bis 8 %.

Ausgehend von üblichen Kostendegressionsfaktoren⁸ und von den im vorhergehenden Kapitel bezifferten heutigen Kosten können diese Ziele damit überprüft werden. Für die Kostendegressionsfaktoren werden ausgehend von einer statistischen Auswertung in vergleichbaren Branchen (Maschinen-, Elektronik-, Automobilbranche, etc. siehe [10]) als untere (pessimistische) Grenze 0.80 und als obere (optimistische) Grenze 0.75⁹ eingesetzt. Bezüglich der Kostendegressionsfaktoren wird angenommen, dass sich diese nur auf die Mehrkosten der Brennstoffzellen-Systeme (gegenüber konventionellen Gasheizungen) auswirken und dass sich die Kostendegression mit steigender Produktion verlangsamt. Es ergibt sich folgender Verlauf für die Degression der Mehrkosten:

⁸ Der Kostendegressionsfaktor gibt an, wie sich die Kosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion eines Produktes verändern. Er ist somit ein Mass für die erzielten Lern- und Skaleneffekte. Die im Rahmen der Arbeit ermittelten Kostendegressionsfaktoren beziehen sich auf den Schweizer Markt.

⁹ Ein niedriger Kostendegressionsfaktor bedeutet, dass die Kosten schneller sinken und entspricht somit grösseren Lern- und Skaleneffekten.

Degression der Mehrkosten von Brennstoffzellenheizgeräten					
Jahr	Produktion	Untergrenze		Obergrenze	
		f ¹⁾	Mehrkosten [Fr./kW]	f ¹⁾	Mehrkosten [Fr./kW]
2001	10	0.75	40'000	0.80	100'000
2002	50	0.75	19'000	0.80	56'200
2003	150	0.75	11'300	0.80	37'500
2004	500	0.75	6'800	0.80	25'400
2005	2'000	0.85	5'200	0.90	21'300
2006	4'000	0.85	4'100	0.90	18'200
2007	12'000	0.85	3'200	0.90	15'500
2008	40'000	0.85	2'400	0.90	13'000
2009	120'000	0.85	1'900	0.90	10'900
2010	350'000	0.85	1'400	0.90	9'300

G:\2001\019\3-Bearb\Berech-Preisentwicklung.xls\BZ

1) f = Kostendegressionsfaktor

Tabelle 21 Abschätzung der Kostenentwicklung (Mehrkosten) von BZ-Heizgeräten

Es zeigt sich, dass die Kostenziele von Fr. 3'000.-- bis zur breiten Markteinführung erreicht werden können, wenn vergleichsweise starke Lern- und Skaleneffekte genutzt werden können. Auf der anderen Seite werden die Kostenziele deutlich verfehlt, wenn geringere Lernfortschritte erreicht werden (Kostendegressionsfaktor zu Beginn 0.80). In diesem Fall wird die Serienfertigung zu den geplanten Zeitpunkten kaum aufgenommen werden können.

Die Kostenziele der Systementwickler erscheinen demnach als sehr ambitiös aber möglich. Zu bemerken ist, dass erfahrungsgemäss die möglichen Kostenreduktionen nicht in jeder Phase an die Endkunden weitergegeben werden. So ist z.B. davon auszugehen, dass sobald die Technologie wirtschaftlich einsetzbar ist, weitere Reduktionen zur Refinanzierung der enormen Entwicklungskosten verwendet werden und die Verkaufskosten nur langsamer sinken.

Kritisch zu verfolgen ist die Entwicklung der Investitionskosten für Heizgeräte mit PEM-Brennstoffzellen. So geeignet PEM-Brennstoffzellen für den Einsatz mit Wasserstoff erscheinen, so grosse Vorbehalte sind beim Betrieb mit Erdgas zu machen. Schon bei der 200 kW Anlage von Ballard, welche bei der Elektra Birseck in Münchenstein in Betrieb ist, wird klar welcher hohe Zusatzaufwand für die Umwandlung von Erdgas in ausreichend reinen Wasserstoff notwendig ist. Aufgrund unseres Kenntnisstandes scheint es uns äusserst anspruchsvoll, ein kostengünstiges Brennstoffaufbereitungsverfahren für kleine PEM-Brennstoffzellensysteme zu entwickeln.

Inwieweit neben dem Brennstoffzellengerät noch zusätzliche Mehrkosten für die Einbindung in das Heizsystem und das elektrische Netz entstehen, hängt vom Grad der Systemintegration der einzelnen Systeme ab.

Das Seriengerät von Hexis wird voraussichtlich neben dem Wechselrichter auch ein Zusatzheizgerät enthalten. Die Einbindungskosten werden sich demnach nur durch den zusätzlichen Elektroanschluss von einer konventionellen Heizung unterscheiden.

Bei Vaillant/Plug Power geht die Systemintegration weniger weit. Ein Zusatzheizgerät und ein allfällig notwendiger Speicher müssen zusätzlich vorhanden sein.

Nutzungsgrad Wärme/Strom

Die von Sulzer Hexis und Vaillant/Plug Power angestrebten minimalen elektrischen Nutzungsgrade für die Seriengeräte betragen 30 resp. 35 %, der Gesamtnutzungsgrad soll bei 85 resp. 80 % liegen.

Berücksichtigt man, dass Niedertemperaturbrennstoffzellen wie die PEM-BZ von Vaillant generell tiefere Nutzungsgrade wie Hochtemperaturbrennstoffzellen (z.B. SOFC) erreichen, erscheinen die von Vaillant angestrebten Werte ambitionierter wie diejenigen von Sulzer Hexis.

Bis zum Jahr 2010 sollte eine weitere Erhöhung der elektrischen Nutzungsgrade vor allem bei der Hexis-Brennstoffzelle möglich sein.

Für die weiteren Berechnungen werden folgende Nutzungsgrade angenommen:

	Hochtemperatur-BZ (SOFC)	Niedertemperatur-BZ (PEM)
el. Nutzungsgrad	35 - 40 %	30 - 35 %
Gesamtnutzungsgrad	80 - 90 %	75 - 85 %

Tabelle 22 Geschätzte Jahresnutzungsgrade von Brennstoffzellenheizgeräten 2010

Nutzungsdauer

Mit Ausnahme des Zellstapels erscheint für sämtliche übrigen Komponenten des Brennstoffzellensystems (Gasaufbereitung, Zusatzheizgerät, Wärmetauscher, Wechselrichter, Steuerung) eine Lebensdauer von 15 Jahren als realistisch.

Beim Zellstapel wird davon ausgegangen, dass dieser während der Lebensdauer des Gesamtsystems mehrfach ausgewechselt werden muss. Die entsprechenden Kosten werden deshalb bei den Wartungskosten berücksichtigt.

Wartungskosten

Für Brennstoffzellenheizgeräte müssen bei den Wartungskosten im Wesentlichen der Ersatz des Zellstapels und die Wartungsarbeiten am Zusatzheizgerät berücksichtigt werden.

Wie bereits erwähnt, weisen die Zellstapel eine noch sehr kurze Lebenserwartung auf und sind zudem noch enorm teuer.

Sulzer Hexis strebt langfristig eine Lebensdauer des Zellstapels von 5 Jahren an. Vaillant geht bei den eingesetzten PEM-Brennstoffzellen von einer höheren Lebenserwartung aus.

Für die Abschätzung der Wartungskosten gehen davon aus, dass die Kosten eines Zellstapels ca. ein Drittel des gesamten BZ-Gerätes betragen, und dass der Zellstapel alle 4 - 8 Jahre gewechselt werden muss. Daraus resultieren bei 4'000 Betriebsstunden pro Jahr Wartungskosten von 1.5 bis gut 4.5 Rp. pro Kilowattstunde produzierter Elektrizität (exkl. Kosten für die Wartung des Zusatzheizgerätes).

Entwicklung der Stromgestehungskosten

Die Berechnung der Stromgestehungskosten im Jahre 2010 erfolgt anhand eines vereinfachten Berechnungsmodells und aufgrund der Annahme, dass die Entwickler ihre Absatzziele bis 2010 tatsächlich erreichen. Es werden folgende Annahmen verwendet:

	Sulzer Hexis	Vaillant
Mehrkosten BZ-Heizgerät [Fr./kW _{el}]	2'000 - 4'000	
Kosten Einbindung [Fr./kW _{el}] ¹⁾	1'000 - 2'000	750 - 1'500
Nutzungsgrad elektrisch [%]	35 - 40	30 - 35
Nutzungsgrad thermisch [%]	45 - 50	45 - 50
Vollbetriebsstunden [h/a]	4'000	
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]	1.5 - 4.5	
Nutzungsdauer [a]	15	
Gaspreis [Rp./kWh]	5.8	
Stromgestehungskosten 2010 [Rp./kWh_{el}]	15 - 26	15 - 26

1) für Vaillant werden spezifisch tiefere Kosten angesetzt, da das Gerät für grössere Objekte (MFH) konzipiert ist.

Tabelle 23 Verwendete Annahmen zur Berechnung der Stromgestehungskosten von BZ-Heizgeräten

Sofern es den Systementwicklern gelingt, die Ziele betreffend Systemkosten und Lebensdauer des Zellstapels in den vorgesehenen Zeiträumen zu erreichen, so besteht die Möglichkeit, mit der Brennstoffzelle in Ein- und Mehrfamilienhäusern bis 2010 wirtschaftlich Strom zu erzeugen.

4.5 Fazit

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der Brennstoffzellentechnologie, welches sich vor allem durch enorme Investitions- und Wartungskosten ausdrückt, ist eine Beurteilung der aktuellen Konkurrenzfähigkeit wenig sinnvoll.

Betreffend der künftigen Entwicklung bestehen noch grosse Unsicherheiten. Es kann jedoch gezeigt werden, dass die entscheidenden Kostenziele der Systementwickler aufgrund der Erfahrungen vergleichbarer Technologien durchaus erreichbar scheinen. Werden die Kostenziele erreicht und kann die Lebensdauer der Zellstapel um den Faktor 10 erhöht werden, so sind die wirtschaftlichen Aussichten erfolgsversprechend.

Sichere Prognosen betreffend der künftigen wirtschaftlichen Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie können auch mit einem Monitoring nicht 'hervorgezaubert' werden. Infolge der relativ grossen Unsicherheiten erscheint es jedoch umso notwendiger, die weitere Entwicklung weiterhin systematisch zu beobachten. Damit kann Folgendes erreicht werden:

- Zunehmende Sicherheit bei der Beurteilung der Erfolgchancen
- Gezielte Verwendung der Mittel für Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen
- Rechtzeitige Vorbereitung der Markteinführung

Zusammenfassend konnten folgende Werte ermittelt werden:

	1990	1995	2000	2010
WKK Brennstoffzellenheizgeräte				
Mehrkosten BZ-Heizgeräte [Fr./kW]	-	-	40'000 - 100'000	2'000 - 4'000
Wartungskosten [Rp./kWh _{el}]	-	-	> 100	1.5 - 4.5
Nutzungsgrad el. [%]	-	-		
- PEM			20 - 30	30 - 35
- SOFC			20 - 30	35 - 40
Nutzungsgrad th. [%]	-	-		
- PEM			30 - 40	45 - 50
- SOFC			40 - 50	45 - 50
Stromgestehungskosten ¹⁾	-	-	-	15 - 26

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für jeweils spezifische Rahmenbedingungen.

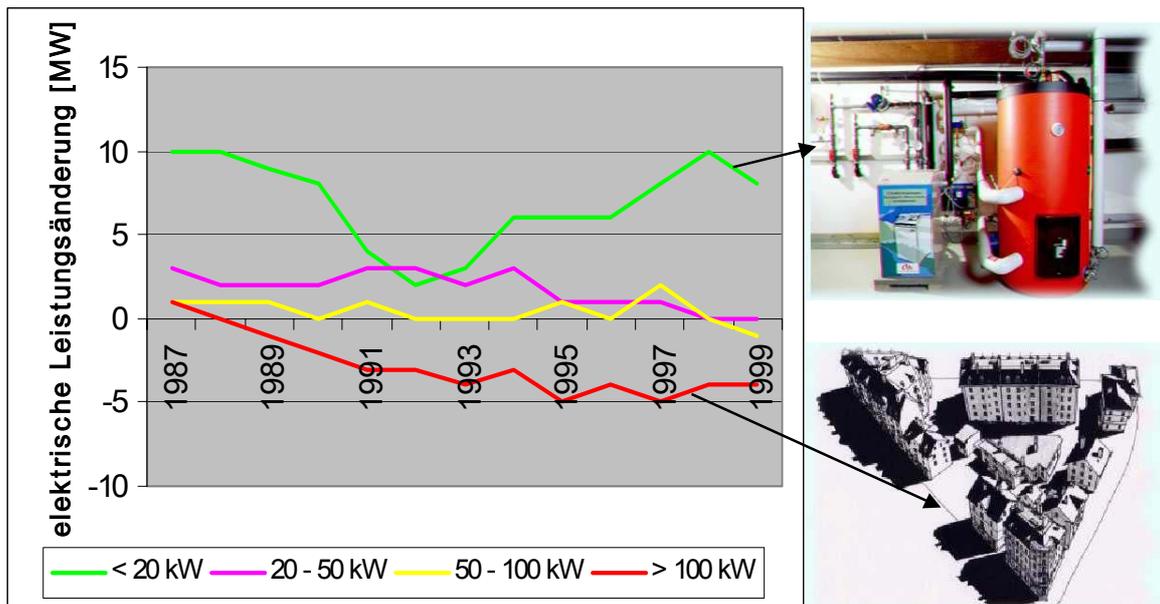
G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls]Gesamt

Tabelle 24 Ermittelte Werte Brennstoffzellenheizgeräte

5 Wärmepumpen

5.1 Marktsituation

Die Statistik der erneuerbaren Energien [12] zeigt, dass die Entwicklung im Wärmepumpenbereich in den letzten 10 Jahren ausschliesslich von den elektrisch angetriebenen Wärmepumpen bestimmt wurde. Die nachfolgende Grafik zeigt die Änderung der am jeweiligen Jahresende installierten elektrischen Leistung von Wärmepumpen. Eine Leistungszunahme bedeutet, dass Wärmepumpen anstelle konventioneller Feuerungen eingesetzt wurden. Ein Leistungsrückgang signalisiert, dass Wärmepumpen stillgelegt oder durch eine andere Energiebereitstellung ersetzt wurden.



Jährliche installierte Netto-Leistung elektrischer Wärmepumpen

Ein vertiefter Blick in die Statistik zeigt, dass die Entwicklung vor allem im EFH Neubau stattgefunden hat, die Wärmepumpe hat dort bereits einen Marktanteil von ca. 35 % erreicht. Im EFH-Sanierungsbereich haben es Wärmepumpen noch wesentlich schwerer, da bereits eine Öl- oder Gasinfrastruktur vorhanden ist und meist nur der Heizkessel ersetzt werden muss, was wesentlich billiger ist als der Umbau der bestehenden Anlage auf eine Wärmepumpenheizung.

Bei grösseren Anlagen ist die Entwicklung bedauerlicherweise rückläufig. Gerade in diesen Bereichen bestehen jedoch noch wesentliche Kosten und Effizienzoptimierungspotenziale.

5.2 Berechnungsmodell

Definition Fallbeispiel

Um die Entwicklung von Wärmepumpen für Einfamilienhäuser (EFH) zu untersuchen, werden die Wärmegestehungskosten unter folgenden Voraussetzungen analysiert:

- Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe mit Aussenluft als Wärmequelle; Wassererwärmung über die Wärmepumpe.
- Die Jahresarbeitszahlen werden aus dem Projekt 'Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen' (FA-WA) übernommen.

Im Verlaufe der vergangenen Jahre haben sich die in den Wärmepumpen eingesetzten Kältemittel durch verschärfte Vorschriften verändert. Der Einfluss dieser Veränderung auf die Jahresarbeitszahl wird mit den FAWA-Daten mitberücksichtigt.

- Einbau der Wärmepumpe in ein Einfamilienhaus mit Bodenheizung. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Wärmepumpe für das entsprechende Einfamilienhaus richtig dimensioniert ist. Da sich die Heizleistung der untersuchten Wärmepumpen je nach Hersteller unterscheidet (zwischen 6 und 8.5 kW bei Auslegungsbedingungen), wird je nach Wärmepumpe der Wärmeleistungsbedarf und der Wärmebedarf des Einfamilienhauses leicht angepasst. Durchschnittlich beträgt der Wärmeleistungsbedarf knapp 7.5 kW und entspricht somit einem lediglich nach Vorschrift isolierten Gebäude (ein z.B. nach Minergie-Standard gebautes Einfamilienhaus kommt mit ca. 3 kW Wärmeleistungsbedarf aus).

Das Berechnungsmodell ist detailliert im Anhang A2 dokumentiert.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Zur Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring analysiert werden sollen, werden in einem ersten Schritt jene Faktoren bestimmt, welche durch Fortschritte in der WP-Technologie beeinflusst werden können. Dies sind insbesondere sämtliche technisch/wirtschaftlichen Faktoren der Wärmepumpen (Investitionskosten, Jahresarbeitszahl, Wartungskosten, etc.) sowie die Investitionskosten für die hydraulische Einbindung.

Für die gewählten Faktoren werden gemäss Kapitel 3.2.5 folgende Eigenschaften beurteilt:

- Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung.
Die Beurteilung erfolgt aufgrund von Expertengesprächen.
- (Gestehungskosten-)Relevanz
Die Bestimmung der Relevanz erfolgt aufgrund einer Sensitivitätsanalyse, bei welcher die einzelnen Faktoren ausgehend von einem Basiswert für das Jahr 2000 um $\pm 20\%$ variiert werden.

Beurteilung der Dynamik der bisherigen Entwicklung

Die Entwicklung der Wärmepumpen-Technologie war in der Schweiz in den letzten 10 Jahren insbesondere durch sinkende **Investitionskosten** geprägt.

Die **Jahresarbeitszahlen** haben sich in den vergangenen 10 Jahren in der betrachteten Leistungsklasse spürbar verbessert. Im Rahmen des Projektes Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (FAWA) wurde im Zeitraum 1994 bis 2000 eine Verbesserung der Jahresarbeitszahl von 10 % ermittelt.

Eine Entwicklung hat auch bei den **Investitionskosten Einbindung, Bau** stattgefunden. Die leichte Abnahme der Kosten kann vor allem auf die allgemeine Baukostenentwicklung zurückgeführt werden.

Ob die Lebenserwartung der WP-Module verbessert werden konnte, kann aufgrund der vorhandenen Daten nicht beurteilt werden. Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird nach wie vor von einer **Nutzungsdauer** von 15 Jahren ausgegangen.

Beurteilung der Dynamik der künftigen Entwicklung

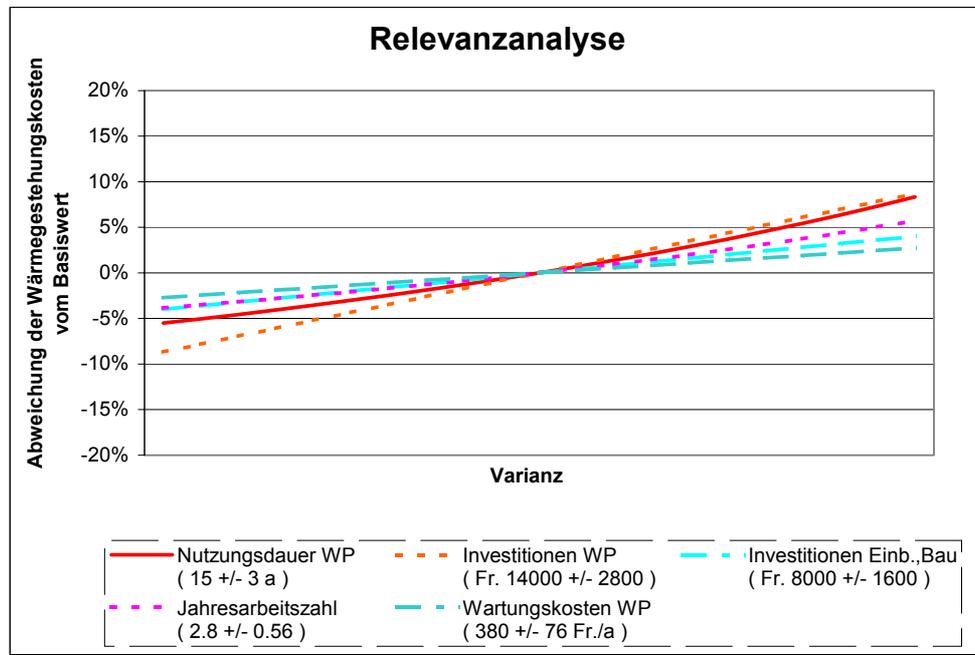
Bei den **Jahresarbeitszahlen** besteht noch ein bedeutendes Potenzial für weitere Verbesserungen, welche sowohl bei den Wärmepumpen-Aggregaten wie auch bei den Wärmeabgabesystemen liegen (tiefere Vorlauftemperaturen).

Die bisherige Entwicklung bei den **Investitionskosten** kann fortgesetzt werden, wenn sich die Rahmenbedingungen des Marktes entsprechend entwickeln. Insbesondere könnten wachsende Absatz-

zahlen in Europa dazu führen, dass einige grosse Hersteller mit einer industrialisierten Produktion die Herstellungskosten wesentlich senken können.

Relevanz

Die Relevanz der einzelnen Faktoren ist in der folgenden Grafik dargestellt.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WP-EFHneu-b.xls\Relevanzanalyse

Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten L/W-Wärmepumpen zur Beurteilung der Relevanz der technisch/wirtschaftlichen Faktoren

Lesbeispiel: Eine Änderung der Investitionskosten für die Wärmepumpe um +/- 20 % (Fr. 14'000 +/- Fr. 2'800) bewirkt eine Veränderung der Stromgestehungskosten um max. 8 %. Um den Einfluss der Faktoren besser vergleichen zu können, sind Kurven der einzelnen Faktoren so an der 0%-Linie gespiegelt, dass sie alle rechts im positiven Bereich liegen.

Bestimmung der Faktoren

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert analysiert werden, erfolgt anhand einer zusammenfassenden Bewertung der Dynamik der bisherigen und der künftigen Entwicklung und der Relevanz der einzelnen Faktoren:

	Beurteilung der Faktoren*				Monitoring
	Dynamik		Relevanz	Wert**	
	1990/2000	2000/2010			
Jahresarbeitszahl	3	3	2	12	ja
Investitionskosten WP	4	4	3	24	ja
Nutzungsdauer WP	0	0	3	0	nein
Wartungskosten WP	1	1	1	2	nein
Investitionskosten Einbindung, Bau	1	1	2	4	nein

* Massstab für Beurteilung der Faktoren:

5 sehr dynamische Entwicklung (Änderungen > +/-50% innerhalb von 10 Jahren) resp. sehr grosse Relevanz (Sensitivität > 20%)
0 keine spürbare Dynamik/Relevanz

**Beurteilungswert: Summe Dynamik 1990/2000 und Dynamik 2000/2010 multipliziert mit Relevanz

Tabelle 25 Bestimmung der Monitoring-Faktoren Wärmepumpen

Verwendete Erfahrungswerte

Für die Faktoren, welche nicht mit einem Monitoring analysiert werden, werden folgende Erfahrungswerte verwendet:

Faktor	verwendete Werte
Nutzungsdauer Wärmepumpe	15 Jahre
Investitionskosten Einbindung, Bau	1990: Fr. 9'200.-- 2000: Fr. 8'000.--
Wartungskosten Wärmepumpe	Fr. 200.- pro Jahr

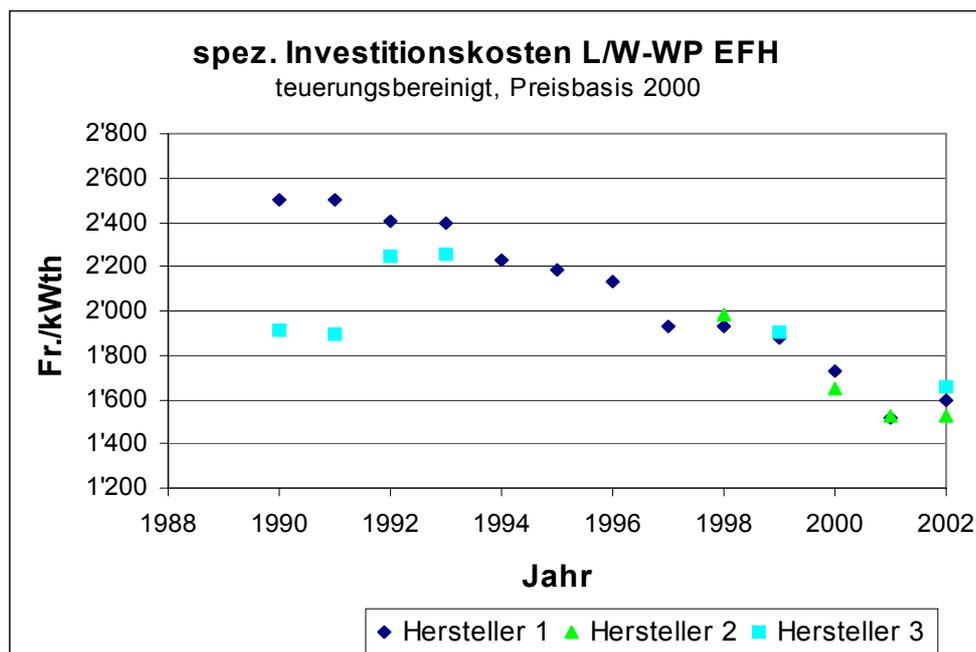
Tabelle 26 Verwendete Erfahrungswerte zur Berechnung der Wärmegestehungskosten

5.3 Bisherige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Funktionen

Investitionskosten Wärmepumpen-Aggregate:

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für Luft/Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser von drei Herstellern, die seit vielen Jahren im Schweizer Markt anbieten.



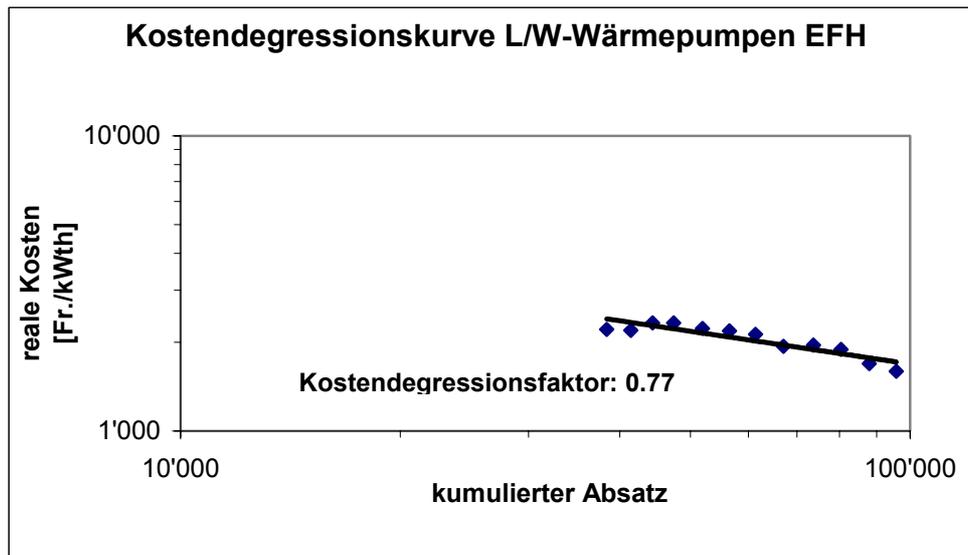
Entwicklung der spezifischen Investitionskosten

Die beiden Aggregate von 1990 und 1991 von Hersteller 3 sind noch mit dem inzwischen verbotenen Kältemittel R502 ausgerüstet. Die thermodynamischen Eigenschaften dieses Kältemittels ermöglichten eine höhere thermische Leistung und somit geringere spezifische Kosten wie mit neueren Kältemitteln.

Die Reduktion der spezifischen Aggregatskosten (WP-Aggregat ohne Speicher) ist eindrücklich, sie beträgt ca. 35 % in den letzten zehn Jahren.

Nach Auskunft der Hersteller konnten auch die zusätzlichen Installationskosten durch einfacher zu installierende Materialien für die Luftführung und dadurch, dass z.B. die Regelgeräte direkt vom Hersteller eingebaut werden, reduziert werden. Im Berechnungsmodell wird eine Reduktion von 15 % berücksichtigt.

Zwischen 1990 und 2001 hat sich die kumulierte Anzahl der in der Schweiz installierten Wärmepumpen von gut 38'000 auf knapp 96'000 erhöht. Vergleicht man die kumulierte Anzahl der Wärmepumpen mit den Investitionskosten für die Wärmepumpenaggregate so ergibt sich daraus folgende Kostendegressionskurve:



G:\2001\019\3-Bearb\[\Lernkurven.xls]EWP

Kostendegressionskurve Wärmepumpen im Zeitraum 1990 bis 2001

Die Kostendegressionskurve kann durch eine Potenzfunktion $C_x/C_o = P_x^{-b}$ angenähert werden, wobei C_o für den Preis der ersten Einheit, P_x für die kumulierte Produktion und b als Konstante für den Grad der Kostensenkung steht. Als Kostendegressionsfaktor f wird die erreichbare Kostenreduktion bei Verdopplung der kumulierten Produktion bezeichnet. Es gilt $f = 2^{-b}$. Aus der oben dargestellten Kurve kann ein Kostendegressionsfaktor von 0.77 entnommen werden. Dies ist ein ausserordentlich tiefer (resp. guter) Wert¹⁰.

Für die Interpretation des ermittelten Kostendegressionsfaktors von 0.77, gilt es Folgendes zu berücksichtigen:

- Die Kosten beziehen sich auf die Verkaufskosten. Diese sind nicht nur abhängig von den Herstellungs- und Vertriebskosten, sondern können z.B. bei einem Überangebot stärker reduziert werden, wie dies Lern- und Skaleneffekte ermöglichen würden.
- Der Betrachtungszeitraum für die Ermittlung des Kostendegressionsfaktors ist eher kurz, so dass z.B. der Verdrängungswettbewerb im Betrachtungszeitraum einen grossen Einfluss ausübt.
- Nicht zurückzuführen ist die Kostenreduktion auf die Entwicklung des europäischen Marktes. Die (spärlich) vorhandenen Zahlen zeigen im Betrachtungszeitraum Wachstumsraten, welche unter denjenigen in der Schweiz liegen, was bei vergleichbaren Kostendegressionsfaktoren zu einer geringeren Kostenreduktion führen müsste.

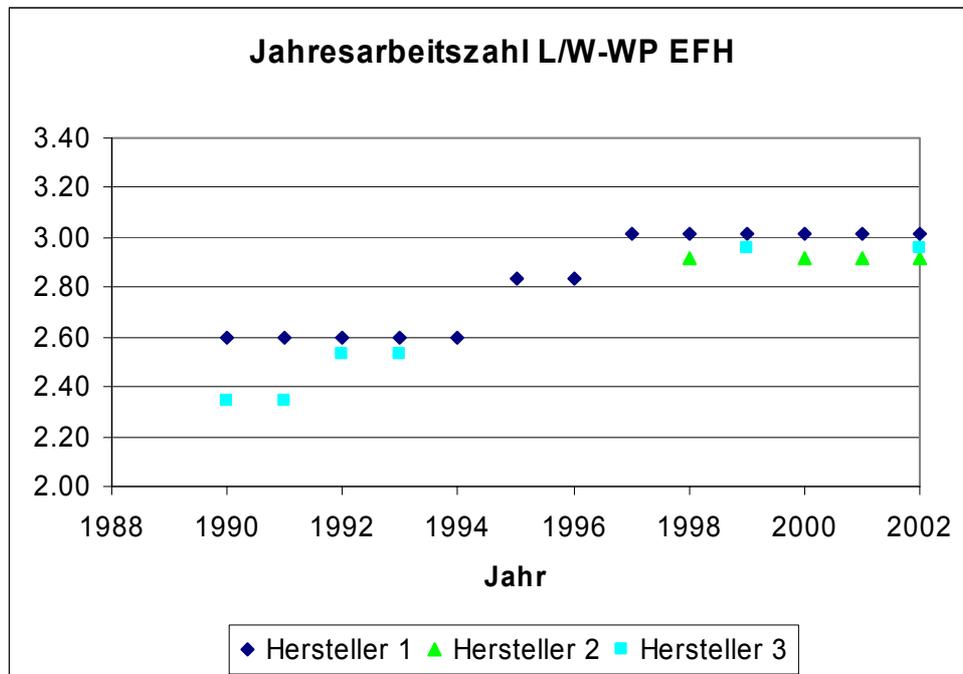
Wir gehen daher davon aus, dass die Preisreduktion im Betrachtungszeitraum nur dadurch möglich war, dass echte Lerneffekte (rationellere Produktion und Vertrieb) durch den vorhandenen Preiskampf (Verdrängungswettbewerb) deutlich verstärkt worden sind. Dass sich der Preiskampf nach Aussagen der Hersteller gegen Ende des Betrachtungszeitraums verschärft hat, wird in der Kostendegressionskurve durch den Verlauf der letzten drei Punkte (1999 bis 2001) ersichtlich.

Ein guter Teil der Reduktion der Investitionskosten kann sicher auf eine rationellere Herstellung zurückgeführt werden. Die Anzahl der Wärmepumpen-Hersteller ist bei steigenden Absatzzahlen in den letzten 10 Jahren deutlich zurückgegangen. Die Aggregate zahlreicher Anbieter stammen nicht mehr aus eigener Produktion. Dies bedeutet, dass die Stückzahlen der einzelnen Hersteller deutlich schneller

¹⁰ Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart hat beispielsweise für die Entwicklung der Photovoltaik zwischen 1976 und 1997 in Deutschland einen Kostendegressionsfaktor von 0.78 ermittelt [9]. Die Werte für andere erneuerbare Energien werden mit 0.84 bis 0.95 angegeben.

gestiegen sind, wie der Gesamtmarkt für Wärmepumpen. Dies ermöglicht den Herstellern eine rationellere Produktion, höhere Mengenrabatte beim Bezug der Komponenten (Kompressor, Wärmetauscher, etc.) und geringere Lagerhaltungskosten.

Jahresarbeitszahl:



Entwicklung der Jahresarbeitszahlen

Für die hier betrachteten Hersteller wurde auch der Effizienzfortschritt der Anlagen anhand der Entwicklung der Jahresarbeitszahlen untersucht. Diese Ergebnisse basieren auf den Ergebnissen des vom BFE finanzierten Projektes „Feldanalysen von WP-Anlagen (FAWA)“. Die Werte entsprechen dem sogenannten Erwartungswert. Der Erwartungswert wird in der Praxis erreicht, sofern die Wärmepumpenheizung richtig ausgeführt wird. Die im Rahmen von FAWA durchschnittlich gemessene Jahresarbeitszahl für L/W-Wärmepumpen in Neubauten lag 2001 bei 2.5 und damit knapp 10 % unter dem Erwartungswert. Die restliche Differenz zu den oben dargestellten Jahresarbeitszahlen von knapp 3.0 liegt an der begrenzten Zahl der ausgewählten Hersteller.

Die Jahresarbeitszahl der untersuchten Anlagen verbesserte sich von 1992 bis 1998 um etwa 20 %. Aufgrund der FAWA-Ergebnisse ist diese Verbesserung auf die gesteigerte Effizienz der Wärmepumpenaggregate zurückzuführen, während die Installation keinen Einfluss hat.

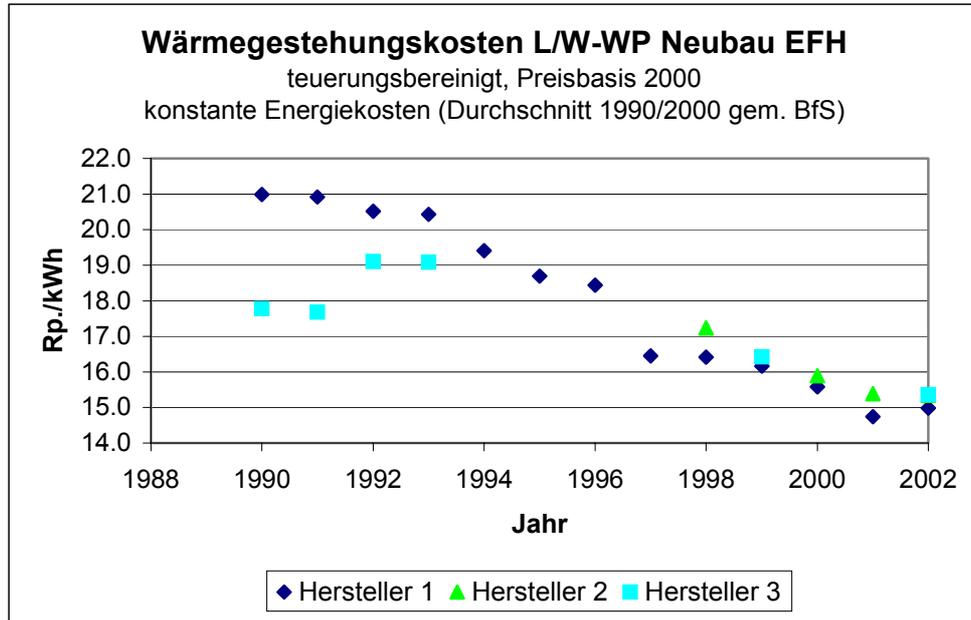
Die Verbesserung kann auf folgende Massnahmen zurückgeführt werden:

- Optimierte Auslegung der Hauptkomponenten (Wärmetauscher, Kompressor)
- Verbesserte Kompressoren (teilweise Scroll-Verdichter)
- Einsatz von besser geeigneten Kältemitteln

Diese Entwicklung wurde sicher stark durch die Realisierung des Wärmepumpen-Testzentrums Töss und die positiveren Marktaussichten ausgelöst.

In den letzten Jahren haben die Hersteller verstärkt versucht, die Herstellungskosten zu senken, was sich teilweise negativ auf die Jahresarbeitszahlen ausgewirkt hat.

Entwicklung der Wärmegestehungskosten



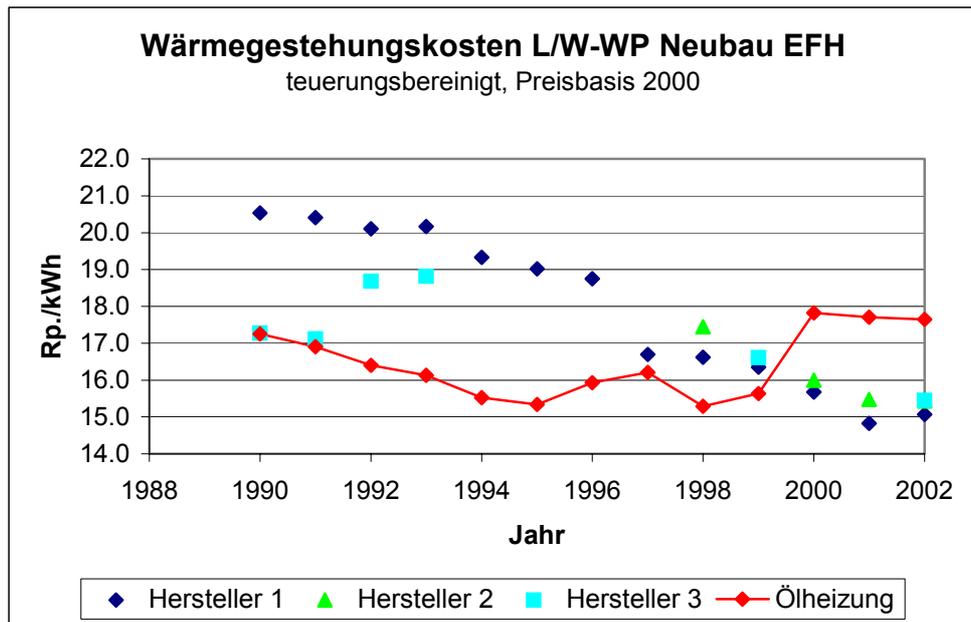
G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WP-EFHneu-b.xls\Ergebnisse

Teuerungsbereinigte Entwicklung der Wärmegestehungskosten unter Annahme konstanter Energiepreise

Die Darstellung zeigt die Wärmegestehungskosten unter der Annahme von konstanten Energiekosten (entsprechend den durchschnittlichen Kosten im Zeitraum 1990 bis 2000 gem. BfS). Die Grafik zeigt, dass die Wärmegestehungskosten aufgrund der gesunkenen Kosten der Aggregate und der verbesserten Jahresarbeitszahlen zwischen 1990 und 2000 um 20 - 25 % gesunken sind. Diese Reduktion ist etwa zu 75 % auf die gesunkenen Aggregatskosten zurückzuführen. Der Anteil der gesteigerten Jahresarbeitszahlen beträgt etwa 15 %, derjenige der reduzierten Installationskosten ca. 10 %.

Um die Konkurrenzfähigkeit am Markt darzustellen, werden in der folgenden Grafik die Wärmegestehungskosten auf der Basis variabler Energiekosten (gem. BfS) dargestellt. Zusätzlich sind die Wärmegestehungskosten für eine konventionelle Ölheizung als wichtigste Konkurrenz eingetragen.

Die Wärmegestehungskosten für eine konventionelle Ölheizung verstehen sich inklusive Verzinsung und Amortisation der gesamten Investitionen (inkl. Öltank, Kamin, etc.), Wartungskosten und erlauben somit einen neutralen Vergleich mit den Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen. Der Anteil der Brennstoffkosten beträgt bei einer Vollkostenrechnung für die untersuchten Einfamilienhäuser lediglich 25 bis 33 %, je nach Ölpreis im entsprechenden Jahr.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WP-EFHneu-b.xls]Ergebnisse

Teuerungsbereinigte Entwicklung der Wärmegestehungskosten bei effektivem Verlauf der Energiepreise

Bis ca. 1994 verlief die Entwicklung der Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen etwa parallel zu derjenigen von konventionellen Ölheizungen, die im Wesentlichen infolge real sinkender Ölpreise günstiger wurden. Die verbesserten Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen wirken sich ab 1996 sichtbar auf die Wärmegestehungskosten aus. Durch den Ölpreisanstieg ab 1999 sind nun die Wärmepumpen wirtschaftlicher als die Ölfeuerungen.

Zusammengefasst können für die Wärmegestehungskosten und die Monitoring-Faktoren folgende Eckwerte festgehalten werden:

Wärmepumpe L/W Neubau EFH	1990	1995	2000
Wärmegestehungskosten [Rp./kWh] ¹⁾	20	19	16
Kosten Aggregat [Fr./kW]	2'400	2'200	1'700
Jahresarbeitszahl	2.6	2.8	3.0

Alle Kostenangaben sind teuerungsbereinigt (Preisbasis 2000)

1) Wärmegestehungskosten unter Berücksichtigung der effektiven Energiepreise in den entsprechenden Jahren

Tabelle 27 Ermittelte Werte I/W-Wärmepumpen EFH Neubau 1990/2000

5.4 Künftige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Funktionen

Investitionskosten Wärmepumpen-Aggregate:

Für eine weitere Senkung der Investitionskosten für Wärmepumpen-Aggregate besteht insbesondere noch durch die Tatsache umfangreicher Spielraum, dass die Montage der Aggregate immer noch in Handarbeit erfolgt. Nach Aussagen der Hersteller ist eine Umstellung der Produktion auf Robotertechnik nur lohnenswert, wenn die Produktionszahlen verzehnfacht werden können. Dies ist bis 2010 für einen Hersteller nur möglich, wenn es gelingt, international wesentliche zusätzliche Marktanteile zu gewinnen. Trotzdem darf aufgrund der Erfahrungen der letzten 10 Jahre auch bei einer nach wie vor gewerblichen Fertigung ein weiteres Optimierungspotenzial vorausgesetzt werden.

Im Folgenden wird versucht, die künftige Entwicklung der Investitionskosten anhand vorhandener Prognosen der quantitativen Entwicklung und der weiteren Entwicklung der Kostendegressionsfaktoren abzuschätzen.

Die European Heat Pump Association rechnet bis 2010 mit einer Verdopplung des Bestandes der installierten Wärmepumpen gegenüber dem Jahr 2000. In der Schweiz soll der Bestand der installierten Wärmepumpen gemäss der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz von heute 60'000 Stück bis 2010 auf mindestens 100'000 Stück erhöht werden. Zu berücksichtigen ist zudem ein zunehmender Ersatz von alten Wärmepumpen (in der Schweiz sind bis 2010 ca. 40'000 Anlagen älter wie 15 Jahre).

Unter Berücksichtigung des Ersatzes älterer Anlagen dürfte sich dies in etwa einen jährlichen Wachstum der Wärmepumpenverkäufe von 8 bis 10 % entsprechen. Der kumulierte Absatz von Wärmepumpen würde sich demnach bis ca. 2008 verdoppeln und 2010 bereits knapp das 2.5fache des heutigen Stands betragen.

Bei einer optimistischen Beurteilung kann davon ausgegangen werden, dass die Entwicklung der letzten 10 Jahre fortgesetzt werden kann (Kostendegressionsfaktor 0.77). Dies scheint möglich, wenn der Verdrängungskampf unter den Herstellern noch anhält und beim Vertrieb der Wärmepumpen eine ähnliche Entwicklung stattfindet.

Vorsichtig beurteilt kann angenommen werden, dass nach der sehr dynamischen Entwicklung der letzten 10 Jahre die Preise nur noch verlangsamt sinken. Orientiert man sich an einer statistischen Auswertung von Kostendegressionsfaktoren in vergleichbaren Branchen (Maschinen-, Elektronik-, Automobilbranche, etc. siehe [10]) erscheint ein Kostendegressionsfaktor von 0.9 unter diesen Umständen als eher pessimistische Einschätzung.

Vorausgesetzt die Kostendegressionsfaktoren liegen in den nächsten 10 Jahren im Bereich von 0.77 bis 0.9, ergibt sich bis 2010 eine Preisreduktion für Wärmepumpen-Aggregate von 13 - 29 %.

Jahresarbeitszahl:

Eine weitere Steigerung der Jahresarbeitszahlen ist für Luft-/Wasserwärmepumpen vor allem mit folgenden Massnahmen möglich:

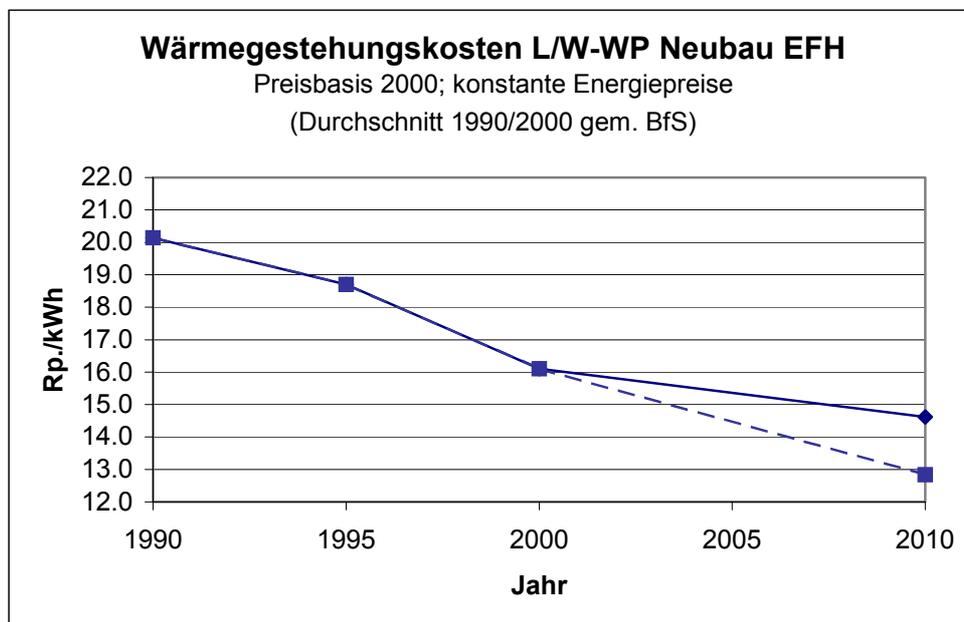
- Optimierung des Gesamtheizsystems (tiefere Vor- resp. Rücklauftemperaturen und neue modellbasierte Regelungskonzepte mit Pulsbreitenmodulation)
- Zwischeneinspritzung/Unterkühlung
- Einsatz neuer Kältemittel

Im Rahmen des Projektes 'Feldanalyse von Wärmepumpen-Anlagen' wurden für die Jahresarbeitszahlen von L/W-Wärmepumpen Bestwerte von rund 3.5 gemessen.

Für die Entwicklung bis 2010 wird als Obergrenze eine Jahresarbeitszahl von 3.5 angenommen, als Untergrenze eine solche von 3.2.

Entwicklung der Wärmegestehungskosten

Die folgende Darstellung zeigt die weitere Entwicklung der Wärmegestehungskosten, welche sich aus den Annahmen betreffend Investitionskosten und Jahresarbeitszahl ergeben. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich die Installationskosten bis 2010 um weitere 10 bis 20 % reduzieren, was insbesondere durch Kompaktunits mit integriertem Zubehör möglich ist. Die Strompreise werden als real konstant angenommen.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-WP-EFH-zukunft-b.xls\Ergebnisse

Künftige Entwicklung der Wärmegestehungskosten bei konstanten Energiepreisen

Aus der Darstellung wird deutlich, dass die Wärmegestehungskosten in den kommenden 10 Jahren weiter deutlich sinken werden. Ob diese Entwicklung im gleichen Tempo weiter geht wie in den letzten 10 Jahren, hängt in erster Linie davon ab, wie stark die Investitionskosten der Wärmepumpen-Aggregate reduziert werden können. Diese Reduktion kann vor allem dadurch ermöglicht werden, dass die Hersteller durch (internationale) Zusammenarbeit ihre Stückzahlen wesentlich steigern.

Zu berücksichtigen ist, dass die Konkurrenzfähigkeit der Wärmepumpen durch das Preisniveau für fossile Energien beeinflusst wird. Bleiben die Heizölpreise gegenüber 2002 konstant, so betragen die Wärmegestehungskosten für eine Ölheizung weiterhin knapp 18 Rp./kWh. Bei der Einführung einer CO₂-Abgabe würde die Heizölpreise dagegen um bis zu 5.5 Rp./kWh (beim Maximalansatz von Fr. 210.--/t CO₂) angehoben und die Wärmegestehungskosten würden auf über 24 Rp./kWh steigen. Selbst wenn die Heizölpreise wieder auf das Rekordtief von Mitte der neunziger Jahre sinken und keine CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe eingeführt wird, liegen die Wärmegestehungskosten für eine Ölheizung mit rund 15 Rp./kWh bis 2010 höher wie diejenigen für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe im EFH-Neubau (siehe Bild oben).

5.5 Fazit

Durch echte Lerneffekte und einen verschärften Preiskampf sind die Aggregatskosten zwischen 1990 und 2000 um real 35 % gesunken. Diese Entwicklung war ausschlaggebend für die Reduktion der Wärmegestehungskosten um 20 bis 25 %, welche dazu geführt hat, dass Luft-Wasser-Wärmepumpen für neue Einfamilienhäuser heute konkurrenzfähig sind. Ein Blick auf die Statistik zeigt einen beeindruckenden Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher und quantitativer Entwicklung.

Es scheint augenfällig, dass die Wärmepumpen-Förderung des Bundes einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Aggregatskosten und der Jahresarbeitszahlen geübt hat. Das Wärmepumpen-Testzentrum in Töss und die Einführung des Gütesiegels verschärfen durch die verbesserte Markttransparenz den Wettbewerb unter den Herstellern. Der Aufwand für das Erlangen eines Gütesiegels ist bei kleinen Stückzahlen kaum zu rechtfertigen und hat mit dazu beigetragen, dass sich die Anzahl der Wärmepumpen-Hersteller in der Schweiz in den letzten 10 Jahren deutlich reduziert hat. Grosse Stückzahlen erlauben den Herstellern nicht nur eine umfassendere Entwicklung und den Betrieb eines dichtes Servicenetzes, sondern ermöglichen auch den Einsatz von rationelleren Produktionsmethoden.

Für die kommenden 10 Jahre kann (bei konstanten Strompreisen) davon ausgegangen werden, dass die Wärmegestehungskosten weiter deutlich sinken, wobei das Tempo maximal gleich hoch bleibt wie bisher. Wie sich diese Entwicklung auf den künftigen Wärmepumpen-Markt auswirken wird, ist selbstverständlich auch abhängig von der Entwicklung der Energiepreise. Vorausgesetzt die Strompreise steigen bis 2010 nicht, werden die Wärmegestehungskosten für LW-Wärmepumpen bis 2010 auch dann günstiger bleiben, wie diejenigen einer Ölheizung, wenn die Ölpreise wieder auf das Tiefpreisniveau von Mitte der neunziger Jahre sinken. Steigen hingegen die Preisen für fossile Energieträger (durch die Einführung einer CO₂-Abgabe), so ergibt sich für die Wärmepumpen im Neubaubereich ein massiver Kostenvorteil gegenüber fossilen Wärmeerzeugungsanlagen.

Zusammenfassend konnten folgende Werte ermittelt werden:

	1990	1995	2000	2010
Luft-/Wasserwärmepumpe EFH-Neubau				
Gerätekosten [Fr.]	2'400	2'200	1'700	1200 - 1'500
Jahresarbeitszahl	2.6	2.8	3.0	3.2 - 3.5
Wärmegestehungskosten ¹⁾	20	19	16	13 - 15

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für jeweils spezifische Rahmenbedingungen.

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls\Gesamt

Tabelle 28 Ermittelte Werte Wärmepumpen

Die Reduktion der Aggregatskosten ist auch für den Sanierungsmarkt vorteilhaft. Durch die bedeutend höheren Kosten für die Einbindung der Wärmepumpe besteht jedoch noch keine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit. Hinzu kommt, dass durch die anspruchsvollere Planung Wärmepumpen im Sanierungsbereich viel zurückhaltender angeboten werden.

6 Hochleistungswärmedämmung

6.1 Marktsituation

Aufgrund steigender Anforderungen an die Gebäudedämmung und der damit verbundenen Zunahme der benötigten Dämmstoffdicken wurde in den letzten Jahren seitens Planer und Bauherrschaft vermehrt der Wunsch nach effizienteren und platzsparenderen Dämmmaterialien laut. Insbesondere bei Häusern nach Minergie-P-Standard (resp. Passivhausstandard) ist der durch Platzmangel bedingte Leistungsdruck inzwischen so gross, dass Hochleistungswärmedämmstoffe auch bei einem vergleichsweise höheren Preis einen entsprechenden Markt finden. Ausserdem gibt es immer wieder Situationen, in denen Platz entweder teuer (z.B. verkleinert eine Innendämmung die nutzbare Fläche), oder schlichtweg nicht vorhanden ist (Türblatt, Rollladenkasten, Dachterrasse), um eine den geltenden Dämmstandards entsprechende Wärmedämmung zu erzielen.

Mit sogenannten Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) erreicht man Wärmeleitfähigkeiten, die um einen Faktor 5 bis 10 geringer sind als bei konventionellen Dämmstoffen. Bisher angewendet wurde diese seit etwa 15 Jahren entwickelte Technologie vor allem im Kühl- und Gefriergerätebau. Mittels modernen Produktionsverfahren und neuester Folientechnologie ist man heute in der Lage, Vakuumdämmplatten herzustellen, welche ihre Funktionstüchtigkeit über Jahrzehnte behalten, sofern diese gegen Auswirkungen von aussen genügend geschützt werden. Damit wird diese Vakuumtechnik auch für den Baubereich interessant.

Der aktuelle jährliche Gesamtmarkt für HLWD wird etwa folgendermassen eingeschätzt:

Kühlgeräte	80'000 m ² /a
Baubereich	25'000 m ² /a
Logistik (zB. Container für Lebensmittel)	10'000 m ² /a
Total	115'000 m ² /a

Tabelle 29 geschätzter Gesamtabatz für HLWD im Jahr 2001

Zu bemerken ist, dass die HLWD auch im Baubereich heute insbesondere dort angewandt wird, wo der Raum für eine konventionelle Dämmung teuer oder gar nicht vorhanden ist (Aussentüren, Dachterrassen, etc.).

6.2 Berechnungsmodell

Definition Fallbeispiel

Gemäss der im Kapitel 3 beschriebenen Methodik wird die Wirkung von Energiesparmassnahmen nach dem Opportunitätskostenansatz bewertet, d.h. mit Hilfe der Energiekosteneinsparungen gegenüber der marktüblichen Technologie. Die Hochleistungswärmedämmung ist also zu vergleichen mit einer herkömmlichen Wärmedämmung, welche entweder bei gleicher Dämmwirkung eine höhere Dämmstärke erforderlich macht oder z.B. bei beschränkten räumlichen Verhältnissen eine bessere Dämmwirkung ermöglicht. Für die vorliegende Studie ist der letztere Fall relevant, da nur dort eine Energieeinsparung im Vergleich zur herkömmlichen Wärmedämmung erzielt wird.

Bei Gebäudesanierungen insbesondere in städtischen Gebieten wird aus Gründen des Stadtbildes oder der Denkmalpflege oft eine Aussenwärmedämmung nicht in Betracht gezogen. Für eine Innendämmung sind Platzmangel und Anschlussprobleme als limitierende Faktoren von grosser Bedeutung. Mit dem Einsatz von Vakuumdämmplatten können bei geringem Verlust an Nutzfläche sehr gute Wand-U-Werte erzielt werden.

Untersucht wird das folgende Fallbeispiel:

- Sanierung eines Mehrfamilienhauses mit 30 cm dickem Backstein-Verbundmauerwerk. Eine nachträgliche Aussenwärmedämmung kommt aus architektonischen Gründen (Stadtbild) nicht in Frage.
- Verglichen werden die folgenden Varianten:
 - Innendämmung mit Mineralwolle als Dämmmaterial ($\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$) und Gipskartonverkleidung.
 - Innendämmung mit Vakuumdämmplatten und Gipskartonverkleidung.
 - Nullvariante: Das Mauerwerk wird wärmetechnisch nicht saniert.
- Die Dämmstärke wird für beide Varianten so optimiert, dass möglichst niedrige Wärmegehungskosten resultieren.
- Der durch die Innendämmung verursachte Nutzflächenverlust wird über eine Verringerung der Mietzinseinnahmen in die Wirtschaftlichkeitsrechnung miteinbezogen (monatlich Fr. 15.--/m²).

Das Berechnungsmodell ist im Anhang detailliert dokumentiert.

Bestimmung der Monitoring-Faktoren

Zur Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring analysiert werden sollen, werden in einem ersten Schritt jene Faktoren bestimmt, welche durch Fortschritte in der HLWD-Technologie beeinflusst werden können. Diese beschränken sich im Wesentlichen auf die Investitionskosten und die Lebenserwartung der Vakuumdämmplatten sowie die zusätzlichen Investitionskosten, welche für ein komplettes Wärmedämmsystem anfallen.

Bei den Investitionskosten wird unterschieden zwischen den Kosten für die Vakuumdämmplatte selbst und den zusätzlichen Systemkosten (Gipskartonverkleidung, Innenabrieb, Befestigungsmaterial, Montage, Planung, etc).

Für die gewählten Faktoren werden gemäss Kapitel 3.2.5 folgende Eigenschaften beurteilt:

- Dynamik der künftigen Entwicklung
Die Beurteilung der künftigen Entwicklung erfolgt aufgrund von Expertengesprächen.
- (Gestehungskosten-)Relevanz
Die Bestimmung der Relevanz erfolgt aufgrund einer Sensitivitätsanalyse, bei welcher die einzelnen Faktoren ausgehend von einem Basiswert für das Jahr 2000 um $\pm 20 \%$ variiert werden.

Beurteilung der Dynamik der künftigen Entwicklung

Bei den Investitionskosten für Vakuumdämmplatten bestehen noch beträchtliche Kostensenkungspotenziale, welche in den kommenden Jahren zweifelsohne in einem erheblichen Masse ausgeschöpft werden dürften. Komplette Systeme mit integrierten Vakuumdämmplatten werden erst vereinzelt angeboten und das Marktvolumen ist noch gering. Es dürften deshalb auch bei den Systemkosten und bei den Einbaukosten von HLWD-Systemen noch beträchtliche Kostensenkungspotenziale vorhanden sein.

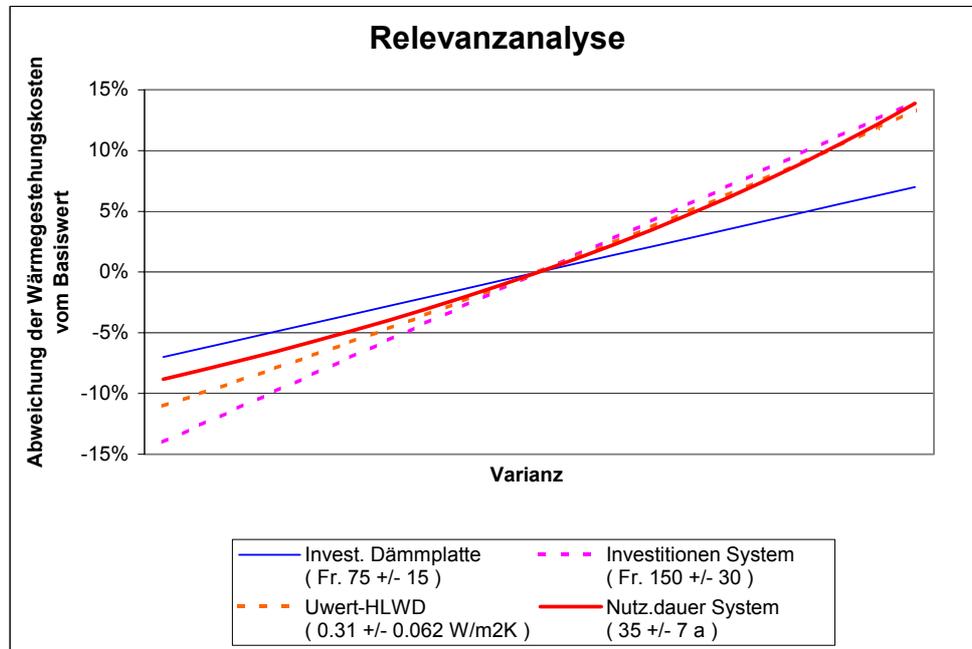
Durch die Weiterentwicklung der Folien kann die Druckfestigkeit verbessert, die Lebensdauer weiter erhöht und die Randwärmebrücke minimiert werden, womit eine weitere Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit erreicht werden kann.

Die Lebenserwartung von Vakuumdämmplatten konnte bereits soweit gesteigert werden, dass sie (bei fachgerechtem Einbau und geeigneten Foliensystemen) auch für die Bedingungen im Baubereich (Feuchte, Temperatur) als geeignet betrachtet werden kann. D.h. die Lebenserwartung liegt bereits

heute im Bereich der übrigen Komponenten der Wärmedämmsysteme. Voraussetzung bleibt natürlich, dass die Vakuumdämmplatten effektiv gegen Einwirkungen von aussen geschützt werden.

Relevanz

Die Relevanz der einzelnen Faktoren ist in der folgenden Grafik dargestellt.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-HLWD-b.xls\Relevanzanalyse

Sensitivitätsanalyse der Gestehungskosten der eingesparten Wärme für die Innendämmungen eines Altbaus mit HLWD zur Beurteilung der Relevanz der technisch/wirtschaftlichen Faktoren

Lesbeispiel: Eine Änderung der Investitionskosten für die Wärmepumpe um +/- 20 % (Fr. 14'000 +/- Fr. 2'800) bewirkt eine Veränderung der Stromgestehungskosten um max. 8 %. Um den Einfluss der Faktoren besser vergleichen zu können, sind Kurven der einzelnen Faktoren so an der 0%-Linie gespiegelt, dass sie alle rechts im positiven Bereich liegen.

Bestimmung der Faktoren

Die Bestimmung der Faktoren, welche mit einem Monitoring detailliert analysiert werden, erfolgt anhand einer zusammenfassenden Bewertung der Dynamik der künftigen Entwicklung und der Relevanz der einzelnen Faktoren:

	Beurteilung der Faktoren*			Monitoring
	Dynamik 2000/2010	Relevanz	Wert**	
Investitionskosten Dämmplatten	5	2	10	ja
Investitionskosten System	3	3	9	ja
Nutzungsdauer System	0	3	0	nein
Uwert-HLWD	2	3	6	ja

* Massstab für Beurteilung der Faktoren:

5 sehr dynamische Entwicklung (Änderungen > +/-50% innerhalb von 10 Jahren)
resp. sehr grosse Relevanz (Sensitivität > 20%)

0 keine spürbare Dynamik/Relevanz

**Beurteilungswert: Dynamik 2000/2010 multipliziert mit Relevanz

Tabelle 30 Bestimmung der Monitoring-Faktoren HLWD

6.3 Aktueller Stand

Stand der Monitoring-Faktoren

Vorbemerkung

Im Rahmen des Projektes 'Hochleistungswärmedämmung' wurden im Auftrag des Bundesamtes für Energie die wichtigsten auf dem Markt angebotenen Vakuumdämmplatten näher untersucht.

Wegen der hohen Einsatzdauer von bis zu 50 Jahren kommen für den Baubereich nur nanoporöse Kieselsäureboards, die mit geeigneten Foliensystemen eingepackt werden, in Frage. Heute sind in Europa vier Anbieter solcher Platten am Markt (Microtherm, Grossbritannien; Porextherm, Wacker und Va-Q-Tec, alle Deutschland).

Im Sinne eines Kategorienvertreters (nanoporöse Kieselsäureboards) sprechen wir im Weiteren von den Wacker Systemen.

Kosten Vakuumdämmplatten

Die Verkaufspreise ab Werk für eine Vakuumdämmplatte Wacker WDS betragen heute (Sommer 2002) bei 20 mm Dämmstärke Fr. 75.--/m².

Ein Vergleich mit konventionellen Dämmmaterialien zeigt, dass die hohen Materialkosten der HLWD durch die guten λ -Werte zum Teil kompensiert werden können. Trotzdem sind die Materialkosten von Vakuumdämmplatten bei gleicher Dämmwirkung noch teurer wie herkömmliche Dämmmaterialien. Aus wirtschaftlicher Sicht kommt der Einsatz von Vakuumdämmplatten dort in Frage, wo der Raum für eine herkömmliche Dämmung nicht vorhanden oder entsprechend teuer ist.

Material	WD-Kosten e_{WD} [Fr/m ³]	W-Leitfähigkeit λ [W/mK]	Kosten pro Wärmedurchlasswiderstand $K_{R, spez}$ [Fr/(m ² K/W)]
Glasfaserplatten ca. 16 kg	104	0,041	4,30
Glasfaserplatten 100 kg	238	0,036	8,60
Steinwolle 35 kg	115	0,040	4,60
Steinwolle 100 kg	250	0,040	10,00
Expandierter Polystyrol 20 kg	123	0,037	4,60
Expandierter Polystyrol 30 kg	198	0,035	7,00
Extrudiert Polystyrol 33 kg	520	0,034	17,70
Polyurethan	322	0,028	9,00
Zellulosefüllung ca. 50 kg	180	0,040	7,20
Schaumglas 130 kg	616	0,040	24,60
HLWD	3'750	0.008	30,00

Die Kostenangaben verstehen sich exklusive Montage- und Unterkonstruktionskosten.

Tabelle 31 Vergleich der Materialkosten verschiedener Wärmedämmmaterialien

Kosten HLWD-Systeme

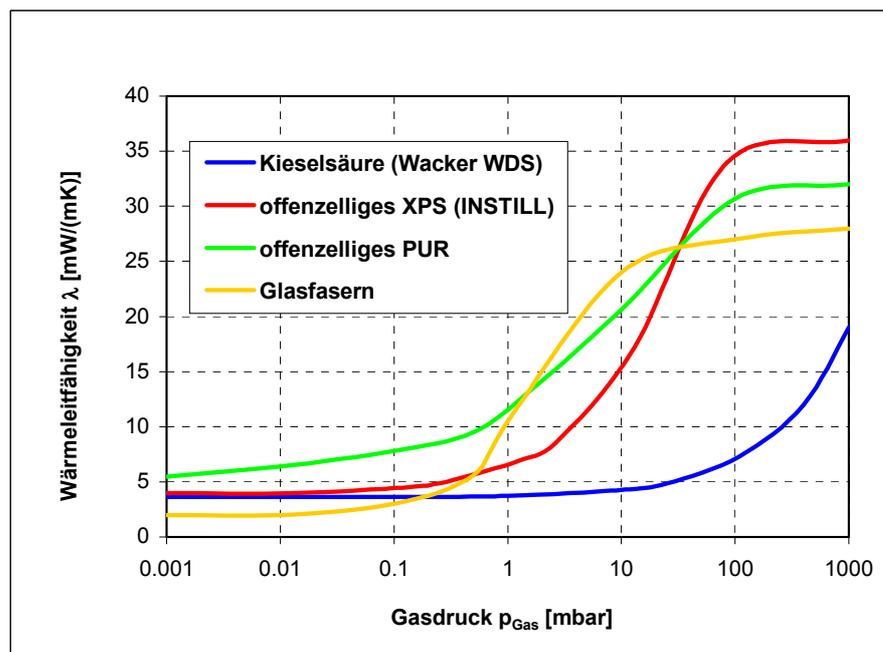
Unter Investitionskosten werden die zusätzlich zur Vakuumdämmplatte notwendigen Kosten verstanden (Gipskartonverkleidung, Innenantrieb, Befestigungsmaterial, Montage, Planung, etc).

Damit die innengedämmte Wand weiterhin normal genutzt wird, wird die empfindliche Vakuumdämmplatte mit einer 4 cm starken Gipskartonverkleidung geschützt. Die Dämmplatten selbst werden mit einem Dispersionskleber auf die Wand geklebt. Randbereiche und Steckdosen werden mit konventionellen Dämmmaterialien (EPS-Platten) ausgeführt.

Aktuell liegen die gesamten Investitionskosten für eine Innendämmung mit Vakuumdämmplatten bei Fr. 200.-- bis Fr. 220.-- pro m^2 , die Systemkosten (ohne Dämmplatte) also bei Fr. 125.-- bis Fr. 145.-- pro m^2 .

Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmplatten

Im Neuzustand, d.h. bei einem Gasdruck von unter 1 mbar weisen die Vakuumdämmplatten Wacker WDS einen λ -Wert von $0.004 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials ist bedeutend geringer wie diejenige herkömmlicher Dämmmaterialien, so dass auch bei Normaldruck resp. wenn das Vakuum durch Alterung oder Beschädigung vollständig verloren geht, der λ -Wert weniger wie $0.02 \text{ W/m}^2\text{K}$ beträgt, also ca. die Hälfte des Wertes üblicher Isolationsmaterialien (siehe Grafik).



Wärmeleitfähigkeit verschiedener HLWD-Systeme

Entscheidend dafür, dass die Wärmeleitfähigkeit über lange Zeit möglichst tief gehalten werden kann, sind insbesondere das Alterungsverhalten der Folie (Dichtigkeit) sowie die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials bei steigendem Gasdruck. Bei gegebenem Kernmaterial ist die über die Nutzungsdauer gemittelte Wärmeleitfähigkeit also abhängig vom Alterungsverhalten der Folie.

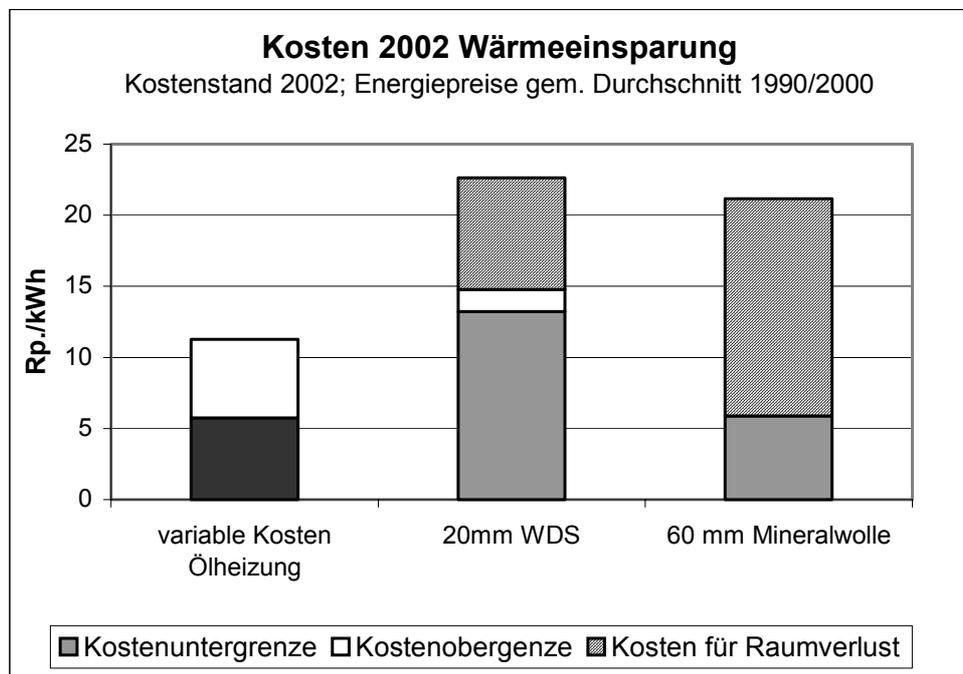
Zwei gegenläufige Effekte sind dafür verantwortlich, wie rasch sich der Gasdruck im Laufe der Zeit erhöht. Durch die Alterung der Folie entstehen neue Fehlstellen und die Dichtigkeit sinkt zunehmend. Dieser Effekt wird dadurch gebremst, dass mit steigendem Gasdruck in der Dämmplatte die Differenz zum Aussendruck sinkt und damit der Gasaustausch verlangsamt wird.

Messergebnisse unter günstigen Bedingungen zeigen, dass mit den heute verfügbaren Folien in den ersten 5 Jahren lediglich mit einem Druckanstieg von 1 mbar pro Jahr gerechnet werden muss. Es ist allerdings unbestritten, dass die äusseren Bedingungen, welche im Baubereich bezüglich Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen vorhanden sind, den Alterungsprozess der Folie beschleunigen. Jedoch ist noch zu wenig genau bekannt, wie stark sich dies auswirkt. Entsprechende Untersuchungen sind in einem laufenden IEA-Projekt (High Performance Thermal Insulation IEA-ECBCS Annex 39) unter schweizerischer Federführung vorgesehen.

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten im folgenden Abschnitt wird angenommen, dass der über die Nutzungsdauer gemittelte λ -Wert ca. $0.008 \text{ W/m}^2\text{K}$ beträgt. Dieser Wert wird erreicht, wenn davon ausgegangen wird, dass bis zum Ende der Nutzungsdauer (Annahme 50 Jahre) der Gasdruck in der Dämmplatte deutlich nicht über 500 mbar und die Wärmeleitfähigkeit damit nicht über $0.012 \text{ W/m}^2\text{K}$ steigt.

Stand der Kosten der eingesparten Wärme

Im Folgenden werden die Gestehungskosten der eingesparten Wärme einer nachträglichen Innenwärmegedämmung mit Vakuumdämmplatten mit den vermiedenen Kosten der Wärmeerzeugung verglichen. Als Basisvariante wird eine Innendämmung mit Mineralwolle berechnet. Die vermiedenen Kosten der Wärmeerzeugung entsprechen im Wesentlichen den eingesparten Brennstoffkosten. Hinzu kommt, dass bei der nächsten Sanierung der Heizung resp. der Wärmeabgabe (Heizkörper) durch den reduzierten Wärmeleistungsbedarf Kosten eingespart werden können. Wir haben hierfür zusätzlich 2 Rp./kWh eingesetzt, sodass die vermiedenen Kosten bei einem Ölpreis von Fr. 32.--/100l (entsprechend dem Durchschnitt von 1990 bis 2000) bei knapp 6 Rp./kWh liegen. Zur Darstellung einer Kostenobergrenze wurde der Ölpreis entsprechend dem Maximalansatz der CO_2 -Abgabe (Fr. 210.--/t CO_2) erhöht.



G:\2001\019\3-Bearb\[Monitoring-HLWD-b.xls]Ergebnisse

Kosten Wärmeeinsparung bei einer Innendämmung mit HLWD resp. Mineralwolle; der Komfortgewinn durch die Wärmedämmung ist nicht berücksichtigt

Die Dämmstärken werden für beide Varianten so optimiert, dass für das gewählte Fallbeispiel (siehe Kap. 7.2.1) möglichst niedrige Wärmegestehungskosten resultieren. Sie liegen für HLWD bei 20 mm und für Mineralwolle bei 60 mm.

Die nachträgliche Innendämmung führt zu einem Verlust an Nutzfläche, welcher entsprechend den Mietzinsen (Fr.15.-- pro m² und Monat) in die Wirtschaftlichkeitsrechnung einfließt. Nicht berücksichtigt ist dagegen der Komfortgewinn durch die Wärmedämmung.

Der U-Wert der Wand verbessert sich durch die Innendämmung mit HLWD (2 cm) von 0.97 auf 0.27 W/m²K. Bei einer Innendämmung mit Mineralwolle (6 cm) beträgt der U-Wert 0.37 W/m²K. Mit einer Hochleistungswärmedämmung kann somit bei kleinerem Nutzflächenverlust eine um knapp 20 % höhere Wärmeeinsparung erreicht werden.

Die Resultate zeigen, dass die Bewertung des Nutzflächenverlustes einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmegestehungskosten haben. Trotzdem führt eine Innendämmung mit HLWD heute auch dann zu höheren Kosten, wenn der Nutzflächenverlust entsprechend üblichen Mietzinsen bewertet wird.

6.4 Künftige Entwicklung

Entwicklung der Monitoring-Faktoren

Kosten Vakuumdämmplatten

Heute setzen sich die Anteile am Verkaufspreis für eine Vakuumdämmplatte mit 20 mm Dämmstärke wie folgt zusammen:

Materialanteil pyrogene Kieselsäure	ca. 33 %
Verarbeitung zu VIP (Kieselsäure pressen, mit Folie umhüllen, vakuumieren und verschweissen), Materialkosten Folie	ca. 66 %
Verkaufspreis	ca. 75 Fr./m ²

Insbesondere bei der Verarbeitung bestehen beträchtliche Kostensenkungspotenziale. Durch den Einsatz grösserer Plattenpressen und einer weitgehenden Automatisierung der Produktion wird von der Wacker Chemie GmbH bis 2004 ein Verkaufspreis von Fr. 45.--/m² (bei 20 mm Dämmstärke) angestrebt. Bis 2010 wird ein Verkaufspreis von Fr. 30.--/m² als untere Grenze genannt.

Da pyrogene Kieselsäure als Nebenfallprodukt bei der Silanproduktion (Silikone, Reinstsilizium) anfällt, richten sich die Materialkosten primär nach der Nachfrage aus den bestehenden Absatzkanälen (u.a. Lebensmittel- und Pharmaindustrie). Eine Kostenreduktion um 20 % ist möglich, wenn deutlich mehr Kieselsäure für Vakuumdämmplatten benötigt wird.

Kosten HLWD-Systeme

Die Systemkosten teilen sich heute in etwa wie folgt auf:

Montage der Dämmplatte, inkl. Kleber, Beratung, Risikozuschlag (ohne Materialkosten Dämmplatte)	Fr. 65 - 85.--/m ²
Kosten Gipsplatte, Randbereiche mit EPS (Material und Arbeit)	Fr. 60.--/m ²
Total	Fr. 125 - 145.--/m ²

Ein Kostenreduktionspotenzial besteht bei den Fr. 65 bis Fr. 85.--/m² für Montage der Dämmplatten, Planung und Risikozuschlag. Für Mineralwolle liegen die entsprechenden Kosten mehr als den Faktor 2 darunter. Die Differenz kann zum grössten Teil auf einen zusätzlichen Aufwand für Beratung, Begleitung bei der Montage und Risikokosten (für beschädigte Platten) zurückgeführt werden. Diese

Kosten werden sich, wenn sich die Hochleistungswärmedämmung bei Architekten, Bauherren und ausführenden Firmen etabliert, markant senken lassen. Für das Jahr 2010 wird davon ausgegangen, dass diese Kosten noch Fr. 30 bis Fr. 50.--/m² betragen, so dass die gesamten Systemkosten auf Fr. 90 bis Fr. 110.--/m² zu stehen kommen.

Wärmeleitfähigkeit Vakuumdämmplatten

Aus rein technischer Sicht sind in den nächsten 10 Jahren kaum weitere Entwicklungssprünge zu erwarten. Zwar existieren Isolationssysteme, welche gegenüber HLWD-Systemen wesentlich tiefere U-Werte besitzen, jedoch wird deren Anwendung infolge der exorbitanten Kosten in absehbarer Zeit der Raumfahrt vorbehalten bleiben.

Wie bereits in Kap. 6.3.1 erwähnt, ist bei gegebenem Kernmaterial das Alterungsverhalten der Folie (Dichtigkeit) entscheidend dafür, dass die Wärmeleitfähigkeit über die Lebensdauer der Vakuumdämmplatte möglichst tief bleibt.

Es ist bekannt, dass in den heutigen Foliensystemen vor allem der Wasserdampf ein potenzielles Alterungsproblem ist. Die heute verwendeten Foliensysteme wurden für den Gefrier- und Kühlbereich entwickelt. Gemäss Vertretern von Dupont können jedoch die bisherigen Foliensysteme auch für Wasserdampfdurchtritt verbessert werden. Es ist daher zu erwarten, dass in künftigen HLWD-Systemen auf der Basis evakuierter nanoporöser Kieselsäuren eine Lebensdauer von mehr als 50 Jahren erreicht werden kann, ohne dass die Wärmeleitfähigkeit in diesem Zeitraum ansteigt.

Wir gehen daher davon aus, dass die mittlere Wärmeleitfähigkeit über die Gebrauchsdauer im Jahre 2010 bei 0.005 bis 0.006 W/mK liegen wird.

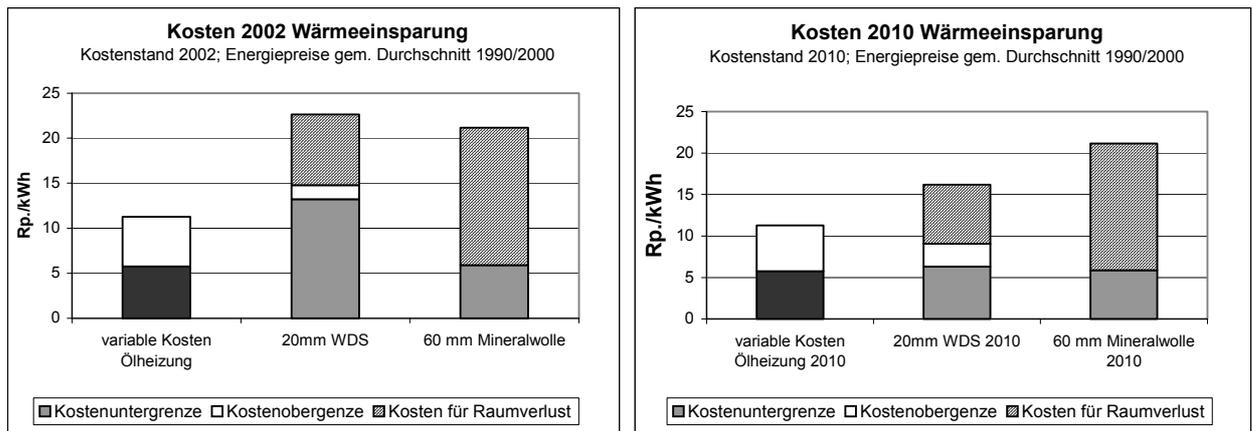
Entwicklung der Wärmegegestehungskosten

Gemäss den vorangehenden Abschnitten kann bis 2010 folgende Entwicklung angenommen werden:

		2002	2010
Kosten Dämmplatte	[Fr./m ²]	75	30 - 45
Systemkosten	[Fr./m ²]	125 - 145	90 - 110
Total	[Fr./m ²]	200 - 220	120 - 155
U-Wert HLWD	[W/m ² K]	0.008	0.005 – 0.006

Tabelle 32 Entwicklung HLWD 2002/2010 (Fallbeispiel: nachträgliche Innenwärmedämmung an bestehendem MFH)

Die folgende Darstellung zeigt die aufgrund dieser Annahmen zu erwartende Entwicklung der Kosten der eingesparten Wärme für eine Innendämmung mit einem Hochleistungswärmedämmsystem und mit Mineralwolle. Als Vergleich sind die variablen Kosten einer Ölheizung dargestellt, wobei die Kostenobergrenze dem Maximalansatz einer CO₂-Abgabe (Fr. 210.--/t CO₂) entspricht.



G:\2001\019\3-Bearb\Monitoring-HLWD-b.xls\Ergebnisse

Tabelle 33 Vergleich der Kosten Wärmeeinsparung 2002/2010 (Fallbeispiel nachträgliche Innendämmung mit HLWD resp. Mineralwolle an bestehendem MFH)

Es zeigt sich, dass die Kosten der eingesparten Wärme für die Hochleistungswärmedämmung um rund 25 - 40 % reduziert werden können. Dadurch wird die Hochleistungswärmedämmung für eine Innendämmung bis 2010 gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wirtschaftlich konkurrenzfähig.

Unter der Annahme von konstanten Heizölpreisen liegen die Kosten jedoch noch immer über dem Niveau der variablen Kosten einer Ölheizung - auch wenn sich der Ölpreis ausgehend vom Durchschnitt 1990/2000 entsprechend dem Maximalansatz der CO₂-Abgabe erhöht. Unter Berücksichtigung des Komfortgewinns kann eine nachträgliche Innenwärmedämmung jedoch trotz der Mehrkosten in vielen Fällen eine lohnenswerte Investition darstellen.

6.5 Fazit

Bei der Innenwärmedämmung eines Altbaus kann mit einem HLWD-System bei geringerem Platzbedarf eine grössere Dämmwirkung erzielt werden.

Einige Unsicherheit besteht noch, wie sich die äusseren Bedingungen, welche im Baubereich bezüglich Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen vorhanden sind, auf das Alterungsverhalten von Vakuumdämmplatten auswirken. Jedoch ist das Isolationsvermögen auch bei einem vollständigen Verlust des Vakuums noch etwa doppelt so hoch wie bei üblichen Isolationsmaterialien.

Heute liegen die Kosten der eingesparten Wärme bei einer Innendämmung mit Vakuumdämmplatten durch die höheren Investitionskosten deutlich höher wie bei der Verwendung von herkömmlichen Dämmmaterialien. Wird der Nutzflächenverlust entsprechend mit einem Ansatz von Fr. 15.-- pro Quadratmeter und Monat (entsprechend üblicher Mietzinsen) bewertet, so bleibt im untersuchten Fallbeispiel nur eine sehr geringe Differenz.

Sowohl die Kosten der Vakuumdämmplatten wie auch die zusätzlich notwendigen Kosten für ein gesamtes Dämmsystem können bei steigendem Marktvolumen bis 2010 noch deutlich gesenkt werden.

Für die untersuchte Innendämmung eines Altbaus zeigt sich, dass die Kosten der eingesparten Wärme für die Hochleistungswärmedämmung bis 2010 um rund 25 - 40 % reduziert werden können. Dadurch wird die Hochleistungswärmedämmung für eine Innendämmung gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wirtschaftlich konkurrenzfähig. Unter der Annahme von konstanten Heizölpreisen bleiben die Kosten jedoch noch deutlich über dem Niveau der variablen Kosten einer Ölheizung. Unter Berücksichtigung des Komfortgewinns kann eine nachträgliche Innenwärmedämmung jedoch trotz der Mehrkosten in vielen Fällen eine lohnenswerte Investition darstellen.

Zusammenfassend konnten folgende Werte ermittelt werden:

	1990	1995	2000	2010
Hochleistungs-Wärmedämmung				
Kosten Dämmplatten [Fr./m ²]	-	-	75	30 - 45
Kosten System [Fr./m ²]	-	-	125 - 145	90 - 110
U-Wert [W/mK]	-	-	0.008	0.005 - 0.006
Gestehungskosten eingesparte Wärme [Rp./kWh]	-	-	21 - 23	13 - 16

1) Die angegebenen Strom- und Wärmegestehungskosten sind zur Darstellung der Auswirkungen der Entwicklung der technisch/wirtschaftlichen Faktoren auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit angegeben. Sie gelten nur für jeweils spezifische Rahmenbedingungen.

G:\2001\019\3-Bearb\Resultate-1.xls]Gesamt

Tabelle 34 **Ermittelte Werte Hochleistungswärmedämmung**

7 Fazit / Empfehlungen

7.1 Fazit

Nutzen und Machbarkeit des Technologie-Monitorings

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Bereitstellung aussagekräftiger Grundlagen für die Beurteilung der bisherigen und der zukünftigen wirtschaftlichen Entwicklung ausgewählter, neuer Energietechnologien. Dabei sollen Hinweise auf die Nutzen, die Wünschbarkeit sowie die Machbarkeit eines systematischen Technologie-Monitorings durch das BFE gewonnen werden.

Für die Faktoren, welche für die wirtschaftliche Entwicklung der untersuchten Technologien massgebend sind, wird versucht, die Entwicklung der letzten 10 Jahre möglichst umfassend zu dokumentieren. Dabei zeigt sich, dass die Beschaffung von Daten, die weiter als zwei bis drei Jahre zurückliegen, sehr aufwändig ist. Häufig sind die Daten bei den Herstellern infolge Umstrukturierungen, Fusionen und Personalwechslern kaum mehr zu ermitteln. Für die Zukunft empfiehlt sich daher eine periodische Erhebung der relevanten Monitoringfaktoren.

Die Analyse der bisherigen Entwicklung der Kosten wie auch zur Beurteilung der künftigen Kostenentwicklung erfolgte mit Hilfe von Kostendegressionsfaktoren¹¹. Es hat sich dabei gezeigt, dass die festgestellten Kostenreduktionen oft genauso stark von der Marktstruktur abhängen, wie von den erzielten Lern- und Skaleneffekten. So reduzieren sich zum Beispiel die Kosten für ein Produkt viel stärker, wie dies allein durch Lern- und Skaleneffekte möglich scheint, wenn das Produkt von geschützten Nischenmärkten (z.B. Pioniermarkt) in die breite Markteinführung geht. Trotzdem erweisen sich Kostendegressionsfaktoren als sehr taugliches Mittel, um vor allem längerfristige Entwicklungen zu beurteilen.

Um die Entwicklung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der Technologien besser beurteilen zu können, wurden mit den dokumentierten Faktoren in einem Berechnungsmodell die Energiegestehungskosten ermittelt.

Insbesondere für die vergangene Entwicklung erweist sich der Verlauf der Energiegestehungskosten als recht aufschlussreich. Die Resultate sind allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, gelten die Energiegestehungskosten doch ausschliesslich für die zu Grunde gelegten Fallbeispiele und können nicht ohne Weiteres auf andere Anwendungsfälle übertragen werden.

Die zukünftige Entwicklung der Energiegestehungskosten ist abhängig vom (hier angenommenen) weiteren Verlauf der Energiepreise, der Zinssätze sowie von den künftigen Rahmenbedingungen wie CO₂ - oder Energieabgaben, technischen und sicherheitsorientierten Vorschriften, etc. Im Rahmen des Technologie-Monitorings sollte auch die Entwicklung der Opportunitätskosten der neuen Technologien (d.h. die Kosten ihrer Alternativen) miterfasst werden.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann aber festgestellt werden, dass für die Beurteilung der wirtschaftlichen Entwicklung der untersuchten Technologien mit dieser Arbeit aussagekräftige und belastbare Grundlagen zur Verfügung stehen. Bei kommerziell verfügbaren Technologien kann für die künftige Entwicklung der wirtschaftlichkeitsrelevanten Faktoren meist ein relativ enges Spektrum mit ausreichender Sicherheit ermittelt werden. Für ausgesprochen neue Technologien, wie z.B. Brennstoffzellenheizgeräte, welche noch nicht kommerziell angeboten werden, ergeben sich dagegen grosse Unsicherheiten. Das Monitoring bei derartigen Technologien wird daher eher dazu dienen, die effektive Entwicklung zu dokumentieren und mit den Technologie- und Herstellerprognosen

¹¹ Der Kostendegressionsfaktor gibt an, wie sich die Kosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion eines Produktes verändern. Er ist somit ein Mass für die erzielten Lern- und Skaleneffekte.

zu vergleichen, damit die Erfolgchancen der Technologien für die Zukunft besser eingeschätzt werden können (für die Technologiepolitik, für allfällige Förderprogramme und für das Marketing).

Fördermassnahmen des Bundes

Mit dem Technologie-Monitoring wird bezweckt, Informationen für die folgenden Aufgaben zu vermitteln :

- Ausrichtung der Energieforschung und der Mittelzuteilung auf zukunftssträchtige Technologien
- Bereitstellung von Informationen zur Anpassung von Förderprogrammen an die eingetretene Technologieentwicklung
- Angebot von Grundlagen zur Ausrichtung von Energiepolitik, EnergieSchweiz und den Abteilungsstrategien im BFE sowie zur Ausgestaltung der Förderkriterien im Gebäudesektor für die Zuteilung der Globalbudgets an die Kantone.

Im Verlaufe der Arbeit hat sich bestätigt, dass die wirtschaftliche Entwicklung einer Technologie massgeblich durch die erzielten Lern- und Skaleneffekte bestimmt wird. Lern- und Skaleneffekte bedingen einander gegenseitig. Infolge technologischen Lernens können technologische Mängel ausgemerzt, die Zuverlässigkeit gesteigert, Anwendungshemmnisse beseitigt und mit innovativen Verfahren die Kosten gesenkt werden. Kostensenkungen stossen andererseits die Nachfrage an, wonach bei steigendem Absatz Skaleneffekte realisiert werden können. Die Lerneffekte sind vom Absatz abhängig, bei grösseren umgesetzten Mengen werden mehr Erfahrungen gemacht und lohnen sich Entwicklungsinvestitionen eher. Es liegt auf der Hand, dass dabei die Anzahl der produzierten Einheiten der einzelnen Hersteller von ausschlaggebender Bedeutung ist. Je höher die Stückzahlen sind, desto eher lohnen sich eine umfassende Entwicklung und Investitionen für die Einführung von rationellen Produktionsmethoden. Dass der Schweizer Markt dafür in der Regel zu klein ist, zeigt sich besonders deutlich bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten, wo die führenden (auch schweizerischen) Geräte-Entwickler entweder den gesamten europäischen Markt, den nord-amerikanischen Markt oder beide Märkte zusammen anvisieren.

Für die Förderung von Technologien zur rationellen Energienutzung oder zur Nutzung erneuerbarer Energien in der Schweiz muss daraus gefolgert werden, dass diese nur dann Aussicht auf Erfolg hat, wenn das internationale Umfeld für die einzelnen Technologien stimmt. Die Koordination der Förderung in der Schweiz mit derjenigen der EU scheint dabei zentral. In diesem Lichte ist die Delegation der direkten Förderung an die Kantone nicht unproblematisch. Es scheint uns deshalb empfehlenswert, bei der Zuteilung der Globalbudgets an die Kantone die Einführung technologiespezifischer Kriterien zu prüfen, um so zu eine gewisse Koordination zu gewährleisten.

Bei einem bestimmten Marktvolumen sind die Stückzahlen der einzelnen Hersteller von der Anzahl der Hersteller abhängig, welche somit die zu erzielenden Lern- und Skaleneffekte massgeblich beeinflusst. Am Beispiel der Wärmepumpen kann gezeigt werden, dass die vom BFE unterstützte Schaffung des Wärmepumpen-Testzentrums und des (internationalen) Gütesiegels deutlich zu höherer Markttransparenz, zu Qualitätssteigerungen und in der Folge zur Konzentration der Anzahl Hersteller beigetragen hat. Das hat bei Wärmepumpen-Aggregaten zwischen 1990 und 2000 eine Kostenreduktion von 35 % ermöglicht. Inwieweit diese oder ähnliche Massnahmen bei anderen Technologien erfolgversprechend sind, sollte geprüft werden.

Die Entwicklung bei den WKK-Anlagen und den Wärmepumpen zeigt deutlich, dass eine Technologie so schnell als möglich aus den Nischenmärkten herauskommen muss, um technologische und wirtschaftliche Fortschritte zu erzielen. Die Förderung von Nischenmarkttechnologien verlangt daher besondere Aufmerksamkeit, periodische Überprüfung und einen Abbruch bei ausbleibender Marktdynamik. Wie bereits erwähnt, sollten deshalb möglichst grosse Märkte anvisiert werden können, was bedingt, dass über Expansion, Kooperationen oder Zusammenschlüsse regionale Kleinanbieter zu mindestens nationalen oder besser noch internationalen Anbietern werden. Allfällige zwischenstaatliche (Handels-) Hemmnisse sind dabei möglichst abzubauen.

'Last but not least' soll erwähnt werden, dass die Gestaltung der Rahmenbedingungen (z.B. durch die Einführung einer CO₂-Abgabe oder durch die Vergütung für Strom von unabhängigen Produzenten) ein entscheidender Faktor für das wirtschaftliche Potenzial einer Energieeffizienz oder einer Energienutzungs-Technologie ist und somit die Investitionsbereitschaft von Herstellern und Entwicklern massgeblich beeinflusst.

7.2 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

- Die hier erarbeiteten Resultate sind den zuständigen Stellen beim Bundesamt für Energie und der CORE sowie den Vertretern der Branchen vorzustellen. Die Wünschbarkeit des Technologie-Monitorings soll geklärt und danach entschieden werden, welche Technologien im Monitoring zu verfolgen sind, wer für das Monitoring zuständig sein soll (mit Ressourcenzuteilung und Erhebungsrhythmus) und nach welchen Verfahren es zukünftigen Entwicklungen anzupassen ist (Aufnahme neuer Technologien, Aufgabe nicht mehr relevanter Technologien).
- Mit den interessierten Stellen ist der Umfang des Monitorings (aufzuzeichnende Faktoren, bisherige und künftige Entwicklung, etc.) und die Finanzierung zu klären.
- Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist es wichtig, dass die massgebenden Faktoren periodisch erhoben werden. Im Bereich der erneuerbaren Energien können diese Faktoren zusammen mit der Statistik ermittelt und dargestellt werden. Damit würden künftig bei vertretbarem Kostenaufwand ausgezeichnete Grundlagen bestehen, um mit relativ geringem Aufwand die Entwicklung der einzelnen Energieträger umfassend zu beurteilen.
- Werden weitere Technologien ins Monitoring einbezogen, dann wäre die detaillierte Ermittlung der **bisherigen** Entwicklung zwar aufschlussreich (nice to have) aber nicht unbedingt notwendig. Um für die Abschätzung der **künftigen** Entwicklung eine gute Basis zu besitzen, erscheint es ausreichend, die bisherige Entwicklung summarisch zu erfassen (z.B. Stand 1990 und 1995).

8 Literaturverzeichnis

- [1] Jakob, Jochem, Christen, Stocker (CEPE/HBT), Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Entwurf Schlussbericht, 22.1.2002
- [2] Eckerle, Haker, Hofer (Prognos AG, Basel), Szenarien zu den Initiativen 'Strom ohne Atom' sowie 'MoratoriumPlus', 2001
- [3] Eicher, Rigassi (Dr. EICHER+PAULI AG, Liestal), Zukünftige Marktbedeutung von WKK-Anlagen mit 1 - 1'000 kW elektrischer Leistung, in Arbeit
- [4] Njtsch, Dienhart (Stuttgart), Wirtschaftlichkeit und Marktperspektiven der Energiewandlung mit Brennstoffzellen, 1997
- [5] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., BHKW-Kenndaten 2001
- [6] (Prognos AG), 'Energieperspektiven der Szenarien I bis III', im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 1996
- [7] Gantner, Jakob, Hirschberg (Paul Scherrer Institut), Perspektiven der zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz unter Berücksichtigung von nachfrageorientierten Massnahmen, 2001
- [8] Häusermann, Stohler, Mustergültig umgebaute Heizzentrale einer Wohnsiedlung, Spektrum der Gebäudetechnik 6/2001
- [9] Nitsch (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart), Probleme der Langfristkostenschätzung, Beispiel erneuerbare Energien 1998
- [10] International Energy Agency (IEA), experience curves for energy technology policy, 2000
- [11] Cogen Europe, future cogen, 2001
- [12] Kaufmann (Dr. EICHER+PAULI AG, Liestal), Statistik der erneuerbaren Energieträger in der Schweiz, aktuelle Ergebnisse
- [13] Kaufmann (Dr. EICHER+PAULI AG, Liestal), Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung in der Schweiz, aktuelle Ergebnisse
- [14] **eco**ncept/INFRAS, Förderstrategien für den Einsatz einer Energieabgabe, im Auftrag des BFE, Zürich/Bern Oktober 1999

Anhang

A1 Berechnungsmodell WKK

Berechnungsmodell Blockheizkraftwerk 100 kW_{el}		
Stand: 27.11.2001		Verfasser: ni
Bereich	Berechnung	Faktor
Jahreskosten		
Kapitalkosten		
Kapitalkosten BHKW	Investitionskosten BHKW* Annuitätsfaktor BHKW	Investitionskosten BHKW [Fr.] Zinssatz [%] Nutzungsdauer BHKW [a]
Kapitalkosten Ölfeuerung	Investitionskosten Ölfeuerung* Annuitätsfaktor Ölfeuerung	Investitionskosten Ölfeuerung [Fr.] Zinssatz [%] Nutzungsdauer Ölfeuerung [a]
Kapitalkosten Einbindung Wärme/Strom, Bauliches	Investitionskosten Einb., Bau* Annuitätsfaktor Einb., Bau	Investitionskosten Einbindung, Bau [Fr.] Zinssatz [%] Nutzungsdauer Einbindung, Bau [a]
Betriebskosten		
Energiekosten BHKW	Brennstoffleistung BHKW* Vollbetriebsstunden BHKW* Gaspreis+ Hilfsenergiekosten BHKW	Brennstoffleistung BHKW [kW] Vollbetriebsstunden BHKW [h/a] Gaspreis [Fr./kWh] Hilfsenergiekosten BHKW [Fr./a]
Energiekosten Ölfeuerung	Brennstoffleistung Ölfeuerung* Vollbetriebsstunden Ölfeuerung* Ölpreis	Brennstoffleistung Ölfeuerung [kW] Vollbetriebsstunden Ölfeuerung [h/a] Ölpreis [Fr./kWh]
Wartungskosten BHKW	spez. Wartungskosten BHKW* Generatorleistung BHKW* Vollbetriebsstunden BHKW	spez. Wartungskosten BHKW [Rp./kWhel] Generatorleistung BHKW [kW] Vollbetriebsstunden BHKW [h/a]
Wartungskosten Ölfeuerung, Einbindung, Bau	spez. Wartungskosten* (Investitionskosten Ölfeuerung+ Investitionskosten Einb., Bau)	spez. Wartungskosten Ölfeuerung, Einb., Bau [%] Investitionskosten Ölfeuerung [Fr.] Investitionskosten Einb., Bau [Fr.]
Personalkosten	spez. Personalkosten* (Investitionskosten BHKW+ Investitionskosten Ölfeuerung+ Investitionskosten Einb., Bau)	spez. Personalkosten [%] Investitionskosten BHKW [Fr.] Investitionskosten Ölfeuerung [Fr.] Investitionskosten Einb., Bau [Fr.]
Versicherungskosten BHKW	spez. Versicherungskosten BHKW* Investitionskosten BHKW	spez. Versicherungskosten BHKW [%] Investitionskosten BHKW [Fr.]
Jahresertrag		
Jahresertrag BHKW	Thermische Leistung BHKW* Nutzungsgrad Wärmeverteilung* Vollbetriebsstunden BHKW* Wert Wärmeerzeugung	Thermische Leistung BHKW [kW] Nutzungsgrad Wärmeverteilung Vollbetriebsstunden BHKW [h/a] Wert Wärmeerzeugung [Fr./kWh]
Jahresertrag Ölfeuerung	Thermische Leistung Ölfeuerung* Nutzungsgrad Wärmeverteilung* Vollbetriebsstunden Ölfeuerung* Wert Wärmeerzeugung	Thermische Leistung Ölfeuerung [kW] Nutzungsgrad Wärmeverteilung Vollbetriebsstunden Ölfeuerung [h/a] Wert Wärmeerzeugung [Fr./kWh]
Stromproduktion		
Stromproduktion Generator	Generatorleistung BHKW* Vollbetriebsstunden BHKW	Generatorleistung BHKW [kW] Vollbetriebsstunden BHKW [h/a]
Stromgestehungskosten		
	(Jahreskosten-Jahresertrag)/ produzierte Energie	
Externe Kosten		
	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge	externe Kosten [Rp./kWh]
Zusatznutzen		
	Qualitative Beurteilung	

A2 Berechnungsmodell Wärmepumpen

Berechnungsmodell L/W-Wärmepumpe EFH Neubau		
Stand: 4.5.2002		Verfasser: ri
Bereich	Berechnung	Faktor
Jahreskosten		
Kapitalkosten		
Kapitalkosten WP	Investitionskosten WP* Annuitätsfaktor WP	Investitionskosten WP [Fr.] Zinssatz [%] Nutzungsdauer WP [a]
Kapitalkosten Einbindung, Bauliches	Investitionskosten Einb., Bau* Annuitätsfaktor Einb., Bau	Investitionskosten Einbindung, Bau [Fr.] Zinssatz [%] Nutzungsdauer Einbindung, Bau [a]
Betriebskosten		
Energiekosten WP	Wärmebedarf/ Jahresarbeitszahl WP* Strompreis	Wärmebedarf [kWh] Jahresarbeitszahl WP Strompreis [Fr./kWh]
Wartungskosten WP		Wartungskosten WP [Fr./a]
Wartungskosten Einbindung, Bau	spez. Wartungskosten Einb., Bau* Investitionskosten Einb., Bau	spez. Wartungskosten Einb., Bau [%] Investitionskosten Einb., Bau [Fr.]
Wärmegestehungskosten	Jahreskosten/ Wärmebedarf	Wärmebedarf [kWh]
Externe Kosten	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge	externe Kosten [Rp./kWh]
Zusatznutzen	Qualitative Beurteilung	

A3 Berechnungsmodell Hochleistungswärmedämmung

Berechnungsmodell HLWD Innendämmung		
Stand: 4.5.2002		Verfasser: ni
Bereich	Berechnung	Faktor
Jahreskosten		
Kapitalkosten		
Kapitalkosten Vakuumdämmplatten	Fassadenfläche* Investitionskosten Dämmplatten* Annuitätsfaktor System	Fassadenfläche [m2] Investitionen Dämmplatten [Fr./m2] Zinssatz [%] Nutzungsdauer System [a]
Kapitalkosten System	Fassadenfläche* Investitionskosten System* Annuitätsfaktor System	Fassadenfläche [m2] Investitionskosten System [Fr./m2] Zinssatz [%] Nutzungsdauer System [a]
Kapitalkosten Einbau	Fassadenfläche* Investitionskosten Einbau* Annuitätsfaktor System	Fassadenfläche [m2] Investitionskosten Einbau [Fr./m2] Zinssatz [%] Nutzungsdauer System [a]
Kapitalkosten konventionelle Instandsetzung (Abzug)	Fassadenfläche* Investitionskosten Instandstellung* Annuitätsfaktor Instandstellung	Fassadenfläche [m2] Investitionen Instandstellung [Fr./m2] Zinssatz [%] Nutzungsdauer Instandstellung [a]
Betriebskosten		
Energiekosteneinsparungen	Wärmeeinsparung* variable Wärmekosten	Wärmeeinsparung [kWh] variable Wärmekosten [Fr./kWh]
entgangene Mietzinseinnahmen	Abwicklung* Anzahl Geschosse* (Wandstärke HLWD - Wandstärke Instandstellung)* Mietzins*12	Abwicklung Gebäude [m] Anzahl Geschosse Wandstärke HLWD [m] Wandstärke Instandstellung [m] Mietzins [Fr./Monat]
Wärmeeinsparung	(Uwert-Sanierung - Uwert-HLWD)* Fassadenfläche* HGT*24/1000	Uwert Instandstellung[W/m2K] Uwert HLWD [W/m2K] Fassadenfläche [m2] Heizgradtage [Kd]
Wärmegestehungskosten	Jahreskosten/ Wärmeeinsparung	Wärmebedarf [kWh]
Externe Kosten	Kalkulatorische Energiepreiszuschläge	externe Kosten [Rp./kWh]
Zusatznutzen	Qualitative Beurteilung	

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

BBL Bestellnummer 805.961 d / 10.03 / 100