

3. März 2003

# Technologie-Monitoring I

## Zusammenfassung

**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:**

Dr. Ruedi Meier, Programm energiewirtschaftliche Grundlagen  
Michael Bhend, Bundesamt für Energie BFE  
Hansueli Schärer, Bundesamt für Energie BFE  
Dr. Bruno Bebié, Industrielle Betriebe der Stadt Zürich  
Thomas Fisch, Amt für Umwelt und Energie BS  
Prof. 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 03.03.2003 9:41

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.xxx d / 00.00 / 0000

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Motorische Wärmekraftkopplung .....	4
	Bisherige Entwicklung .....	4
	Zukünftige Entwicklung .....	5
	Ermittelte Werte.....	5
1.3	Brennstoffzellen.....	6
	Aktueller Stand .....	6
	Zukünftige Entwicklung .....	6
	Ermittelte Werte.....	7
1.4	Wärmepumpen.....	7
	Bisherige Entwicklung .....	7
	Zukünftige Entwicklung .....	8
	Ermittelte Werte.....	8
1.5	Hochleistungswärmedämmung.....	9
	Aktueller Stand .....	9
	Zukünftige Entwicklung .....	9
	Ermittelte Werte.....	10

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 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<sub>e</sub>), Brennstoffzellenheizgeräte für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Luft-/Wasserpumpen für neue Einfamilienhäuser sowie die Hochleistungswärmedämmung untersucht.

## 1.2 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 Kostendegressionsfaktor <sup>1)</sup> 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 (Bauteilscheide 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
<b>WKK motorisch 100 kW<sub>el</sub></b>				
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 <sub>el</sub> ]				
- Erdgas	5.5	4.5	3.5	2.5 - 3.0
- Diesel	-	-	4.2	3.2 - 3.7
Stromgestehungskosten <sup>1)</sup>	21	16	12	9 - 11
<b>WKK motorisch 400 kW<sub>el</sub></b>				
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 <sub>el</sub> ]				
- Erdgas	-	4.25	3.0	2.0 - 2.5
- Diesel	-	-	3.7	2.7 - 3.2
Stromgestehungskosten <sup>1)</sup>	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.).

**Tabelle 1**    **Ermittelte Werte für motorische WKK-Anlagen mit 100/400 kW<sub>el</sub>**

## 1.3 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 Kostendegressionsfaktor<sup>1)</sup> 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 erfolgversprechend.

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. 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
<b>WKK Brennstoffzellenheizgeräte</b>				
Mehrkosten BZ-Heizgeräte [Fr./kW]	-	-	40'000 - 100'000	2'000 - 4'000
Wartungskosten [Rp./kWh <sub>el</sub> ]	-	-	> 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 <sup>1)</sup>	-	-	-	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<sub>el</sub>

## 1.4 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<sup>1)</sup> 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.

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.

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 Wärme-gestehungskosten 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 Wärme-gestehungskosten von 10 bis 20 % scheint bei konstanten Strompreisen als wahrscheinlich. Vorausgesetzt die Strompreise steigen bis 2010 nicht, werden die Wärme-gestehungskosten 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
<b>Luft-/Wasserwärmepumpe EFH-Neubau</b>				
Gerätekosten [Fr.]	2'400	2'200	1'700	1200 - 1'500
Jahresarbeitszahl	2.6	2.8	3.0	3.2 - 3.5
Wärmegestehungskosten <sup>1)</sup>	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**

## 1.5 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.--/m<sup>2</sup>. Im Neuzustand beträgt der U-Wert der Dämmplatten 0.004 W/m<sup>2</sup>K. Über eine Lebensdauer von 50 Jahren wird mit einem U-Wert von 0.008 W/m<sup>2</sup>K 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.--/m<sup>2</sup>, 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.--/m<sup>2</sup> 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
<b>Hochleistungs-Wärmedämmung</b>				
Kosten Dämmplatten [Fr./m <sup>2</sup> ]	-	-	75	30 - 45
Kosten System [Fr./m <sup>2</sup> ]	-	-	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**