

Auslegung von Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken

Dipl.-Ing. (FH) Friedhelm Steinborn (steinborn@bhkw-info.de), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Heßbrühlstr. 21C, 70565 Stuttgart

Einleitung

Die auf dieser Tagung „Brennstoffzellen... effiziente Energietechnik der Zukunft“ gehaltenen Vorträge zeigen eine eindrucksvolle Entwicklung einer an sich alten Technologie. Denn eine der ersten Brennstoffzellen wurde schon vor ca. 160 Jahren von dem Engländer Sir William Robert Grove (1811-1896) aus vier hintereinander geschalteten Elementen konstruiert /Ostwald 1896/.

Seit dem ersten Ölschock und der Diskussion um eine mögliche Klimakatastrophe hat diese Technologie neues Interesse gefunden und konnte dank Materialforschung, neuartiger Materialerzeugung, Oberflächenana-

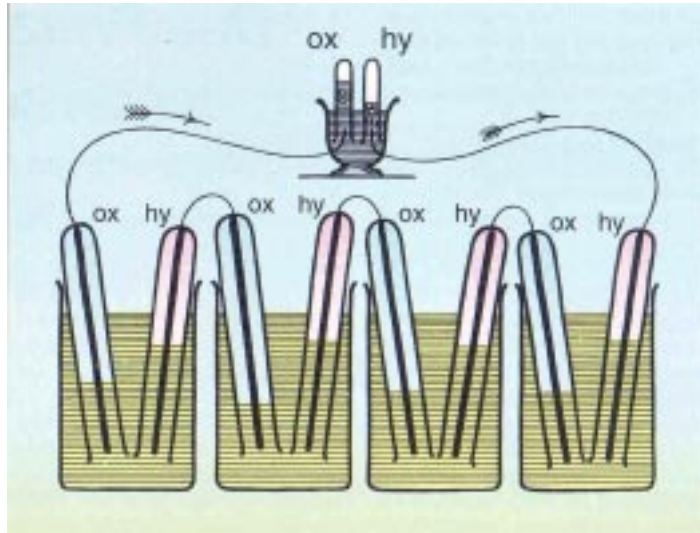


Abb.1: Erste Brennstoffzelle von Sir William-Robert Grove

lyse und vielem mehr weiterentwickelt werden. Neue Akteure haben mit sehr hohem Kapitaleinsatz besonders die PEM-Brennstoffzellen für den mobilen Antrieb weiterentwickelt.

Darum können wir uns heute über den Einsatz und Betrieb von Brennstoffzellen Gedanken machen. In meinem Vortrag möchte ich mich dabei auf den Einsatz in Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken beschränken.

Seit mehr als 5 Jahren beschäftige ich mich mit der Auslegung und Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken. Als Entwickler des Programms BHKW-Plan verfüge ich über umfassende Erfahrungen auf diesem Gebiet. Ständige Marktbeobachtung und Kontakte mit BHKW-Herstellern und Nutzern geben mir einen detaillierten Einblick in die heutige Situation und in neue Entwicklungen.

Konkurrenz der Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke

Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke müssen sich der Konkurrenz von Motor- und Gasturbinen-Blockheizkraftwerken stellen. Die enorme Überlegenheit der Brennstoffzellen-BHKW hinsichtlich der Luftschadstoff-Emissionen könnte jedoch ausschlaggebend für ihren Einsatz sein. Dies hängt jedoch auch von den politischen Rahmenbedingungen ab, da z.B. erst eine CO₂-Steuer, oder ähnliche Maßnahmen zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls, eine CO₂-Vermeidung auch wirtschaftlich interessant machen. Denn in anderen Bereichen, wie zum Beispiel beim elektrischen Wirkungsgrad, kommen die Vorteile des Brennstoffzellen-BHKW erst mit Ausschöpfung der technischen Potentiale zum tragen.

Abb. 2 zeigt die elektrischen Wirkungsgrade verschiedener Energieerzeuger. Diese Grafik ist jedoch durch die Entwicklung der letzten Jahre innerhalb der Motoren- und Gasturbinentechnik in diesen Bereichen nicht mehr aktuell.

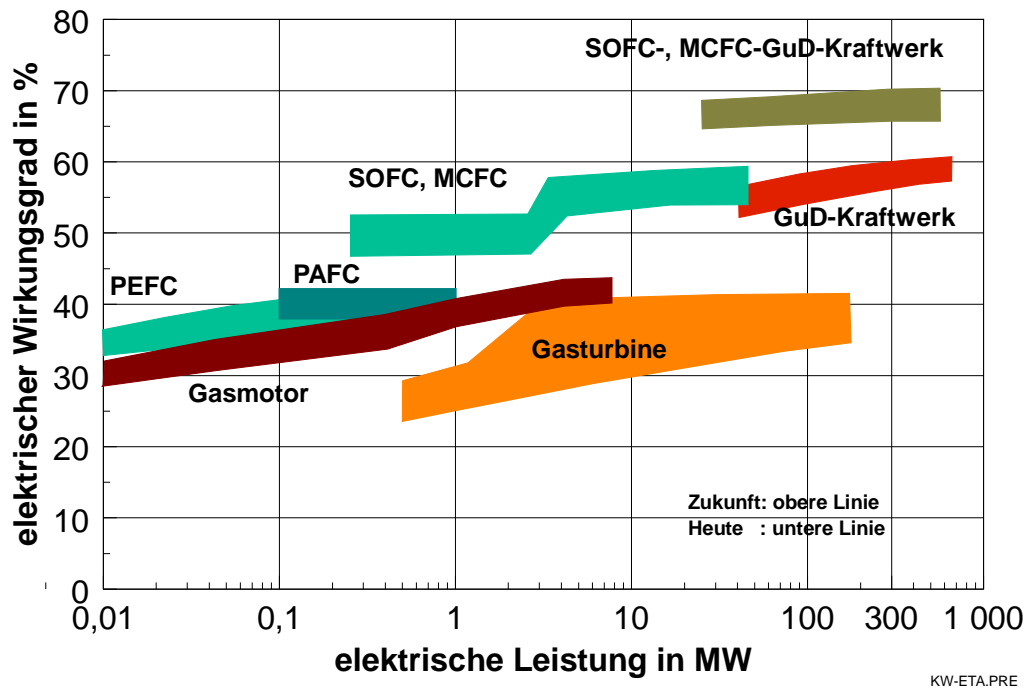


Abb. 2: Elektrischer Wirkungsgrad verschiedener Energieerzeuger

Entwicklungen der letzten 5 Jahre bei Motor-BHKW

Die Motoren blicken ähnlich wie die Brennstoffzellen auf eine lange Geschichte zurück. In Abb. 3 ist der erste 15.000 PS (11 MW) große 9-Zylinder-Zweitakt-Dieselmotor von der Firma B & V Ind. zu sehen. Er wurde vor über 80 Jahren gebaut und war damals der größte Dieselmotor der Welt. Seitdem hat sich viel in der Motorenentwicklung getan; insbesondere bei den Motoren kleiner Leistung wurde in den letzten fünf Jahren viel erreicht. Hier einige Beispiele von Motor-BHKW mit ihren elektrischen Leistungen und Wirkungsgraden:

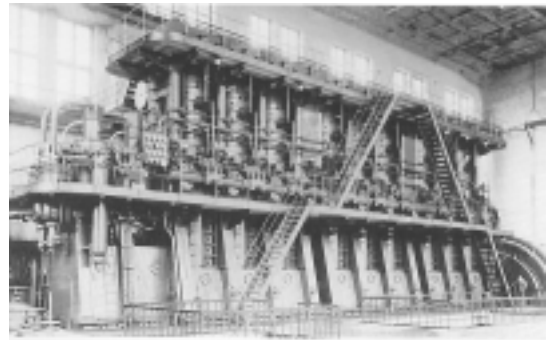


Abb.3: 15.000 PS Dieselmotor

Motor BHKW SenerTec (DACHS HKS)

Elektrischer Wirkungsgrad: 26 %
 Elektrische Leistung: 5,5 kW



Abb. 4: Motor-BHKW SenerTec

Motor-BHKW Ecopower

Elektrischer Wirkungsgrad: 25 %
Elektrische Leistung : 1,5-5,0 kW
modulierend



Abb.5: Motor-BHKW Ecopower

Motor-BHKW PowerTherm (Miturbo)

Elektrischer Wirkungsgrad: 33 %
Elektrische Leistung: 8,0-20,0 kW
modulierend



Abb.6: Motor-BHKW PowerTherm (Miturbo)

Motor-BHKW Zeppelin CAT

Elektrischer Wirkungsgrad: 40,2 %
Elektrische Leistung: 3700 kW



Abb.7: Motor-BHKW Zeppelin CAT

Entwicklung der Mikrogasturbinen

Die noch relativ junge Entwicklung der Mikrogasturbinen im Leistungsbereich bis 200 kW_{el} stellt eine effiziente Alternative zur dezentralen Stromversorgung und zur Wärme-, Kälte- und Dampfversorgung durch Mikroturbinen-KWK-Anlagen bereit. Aufgrund der Liberalisierung der Strommärkte ist ein großes Marktpotenzial für Mikrogasturbinen zu erwarten, da viele EVU zunehmend Konzepte zur dezentralen Energieerzeugung in ihre Versorgungsstruktur integrieren.

Mikrogasturbinen sind insbesondere auch für die mittelständische Industrie interessant, da das hohe Temperaturniveau der Abwärme eine vielfältige Wärmenutzung ermöglicht. Weitere Nutzungsmöglichkeiten bestehen in der Strom-, Wärme- und Kälteversorgung von Wohnanlagen, Hotels, Krankenhäusern, Wäschereien etc. Da Mikroturbinen klein, leicht und transportabel sind, können sie auch kurzzeitig, z.B. zur Energieversorgung von Großbaustellen oder Großveranstaltungen, eingesetzt werden.

Weitere Marktchancen entstehen durch die Einbindung von Gasturbinen in Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Konzepte, welche vielfältige Möglichkeiten zur dezentralen und flexiblen Energieversorgung bieten. Insbesondere die direkte Kopplung von Brennstoffzellen und Kleinstgasturbinen erschließt ein großes Marktpotenzial, denn hier können kleine, dezentrale Kraftwerke Wirkungsgrade von bis zu 65% erreichen, und damit effizienter als Großkraftwerke arbeiten.

Angesichts des beträchtlichen Einsatzpotenzials ist der Markt für Mikrogasturbinen weltweit in Bewegung geraten, jedoch steht seine Entwicklung noch am Anfang. Die Krefelder G.A.S. Energietechnik GmbH stellt eine Mikrogasturbine mit elektronischem Getriebe vor, deren Leistung über die Drehzahl geregelt wird. Damit wird erreicht, dass die Turbine im Teillastbetrieb nur geringe Wirkungsgradverluste aufweist.

Der elektrische Wirkungsgrad von Mikrogasturbinen mit Rekuperator liegt heute bei 25 – 28%, gegenwärtig laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte haben zum Ziel, diesen auf 35-40% zu erhöhen. Durch die direkte Kopplung von Gasturbinen und Brennstoffzellen werden heute schon Wirkungsgrade bis 65% erreicht.

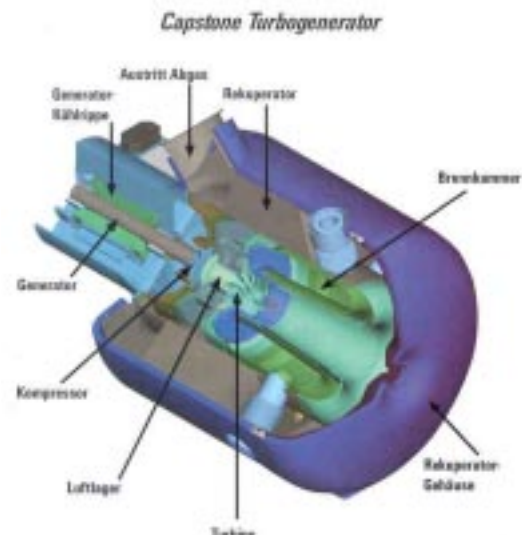


Abb.8: Mikrogasturbine

Einsatzgebiete von BHKW

Um den wirtschaftlichen und ökologisch sinnvollen Betrieb von BHKW zu gewährleisten, sind zwei Grundvoraussetzungen wichtig:

- möglichst gleichzeitiger Bedarf an Wärme und Strom
- möglichst hohe Vollbenutzungsstunden

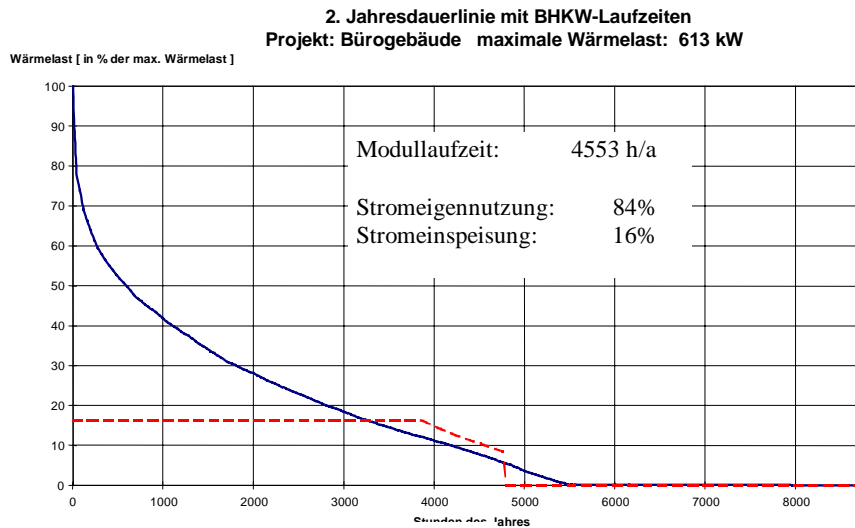


Abb.9: Jahresdauerlinie für Bürogebäude

In den Grafiken 9 und 10 sind die geordneten Jahresdauerlinien der Wärmelast für ein Bürogebäude und ein Hallenbad dargestellt. BHKW werden i.d.R. lediglich zur Deckung der Grundlast eingesetzt, um eine hohe Laufzeit zu gewährleisten. Im Bürogebäude erreicht das BHKW nur eine Laufzeit von ca. 4500 h/a, damit ist es nur unter besonders günstigen Randbedingungen wirtschaftlich (hoher Strombezugspreis, geringe Wartungskosten oder Förderung der Investition).

Durch eine zusätzliche Kühlung in den Sommermonaten könnte man die Laufzeit erhöhen. Im Hallenbad dagegen werden lange Modullaufzeiten auf Grund des Wärmebedarfs erreicht. Durch die Strompreisregelungen könnten sich für den Sommerbetrieb die Laufzeiten reduzieren.

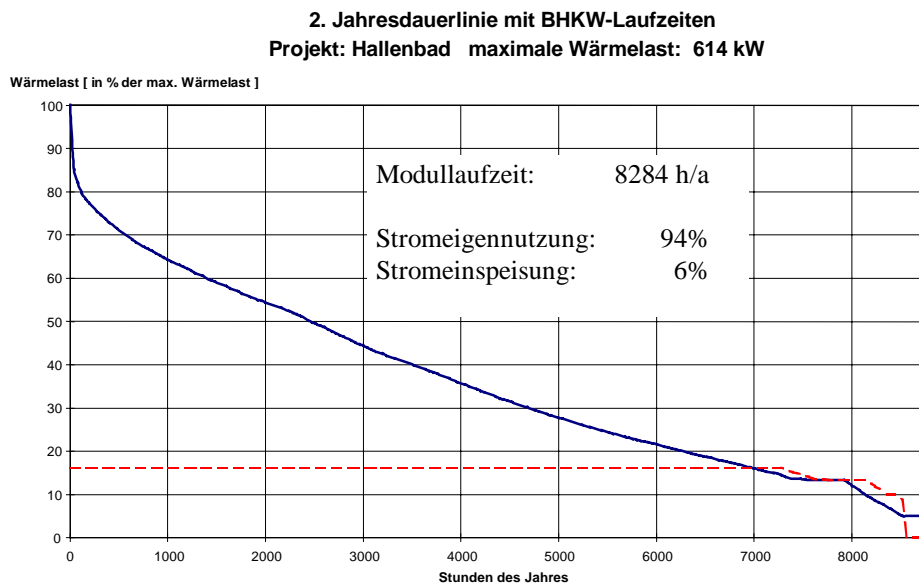


Abb.10: Jahresdauerlinie für Hallenbad

Die typischen Einsatzobjekte von BHKW zeichnen sich durch einen kontinuierlichen Wärmeverbrauch über das ganze Jahr aus:

- Hallenbäder
- Krankenhäuser
- Altenheime
- Verwaltungsgebäude
- Industriegebäude mit entsprechendem Prozesswärmebedarf
- Nahwärmenetze mit gestreuter Gebäudecharakteristik
- klimatisierte Objekte (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung)

Randbedingungen für die Auslegung von Blockheizkraftwerken

Die Auslegung des BHKW verfolgt drei Ziele: Es wird eine Minimierung der zur Wärme- und Stromversorgung eingesetzten Brennstoffe und damit eine Reduzierung der Schadstoffemissionen angestrebt, zugleich muss ein wirtschaftlicher Betrieb des BHKW-Systems gewährleistet werden. Die Auslegung gliedert sich in drei Schritte: Wärme- und Strombedarfsberechnung für das zu versorgende Objekt, Simulation des BHKW-Betriebs und Wirtschaftlichkeitsanalyse. Das Programm *BHKW-Plan* führt auf der Basis einer umfangreichen Gebäudedatenbank oder individueller Eingaben eine detaillierte Bedarfsberechnung durch und simuliert in Stundenschritten den Betrieb des gewählten BHKW-Systems. Ein Vergleich mit der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom gibt Auskunft über die Wirtschaftlichkeit und die Schadstoffreduzierung.

Wärme- und Strombedarf

Die grundlegenden Parameter für die Auslegung des BHKW sind der Wärme- und Strombedarf. Hierbei spielt neben dem jährlichen Verbrauch auch das Lastprofil eine entscheidende Rolle, da das BHKW in der Regel die Grund- und Mittellast des Wärmebedarfes deckt. Ein gleichmäßiger Wärmebedarf mit zeitlich parallel verlaufendem Strombedarf stellt somit den Idealfall für die BHKW-Nutzung dar, da hier lange BHKW-Laufzeiten erreicht werden und der produzierte Strom im Objekt selbst genutzt werden kann. Anhand von Jahresdauerlinien und Tagesganglinien wird die erforderliche thermische bzw. elektrische Leistung des BHKW ermittelt.

Kosten

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse vergleicht die Wärme- und Stromversorgung durch das BHKW mit der getrennten Erzeugung. Wichtige Einflußgrößen dabei sind:

- Investitionskosten
- Brennstoffkosten
- Betriebskosten

Bewertung des erzeugten Stroms

Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit des BHKW ist die Bewertung des erzeugten Stroms. Bei Eigennutzung ergibt sich diese Bewertung aus den vermiedenen Strombezugs-kosten und hängt somit vom bisher zu bezahlenden Strompreis ab. Wird der im BHKW erzeugte Strom ins Netz eingespeist, richtet sich der Erlös nach der Einspeisevergütung; aufgrund der geringen Vergütung ist der eingespeiste Strom heute immer geringer zu bewerten als der selbst genutzte Anteil. Dies kann sich jedoch künftig ändern, verschieden Maßnahmen werden bereits diskutiert: Einheitliche und höhere Festlegung der Vergütung im Strom-einspeisegesetz, KWK-Quotenregelung, CO₂-Zertifikate und Stromnetzstützungs-Vereinbarungen werden zu höherer Bewertung des eingespeisten Stroms führen.

Betriebsweise der BHKW-Module

Neben der richtigen Dimensionierung der BHKW-Module hat auch die Betriebsweise einen großen Einfluß auf ihre Wirtschaftlichkeit und Effizienz. So wird z.B. durch eine strom-optimierte Betriebsweise der Nutzen des BHKW gesteigert, da ein größerer Anteil des erzeugten Stroms im Objekt selbst verbleibt. Durch die Einbindung des BHKW-Systems in eine dezentrale Energieversorgungsstruktur kann die Wirtschaftlichkeit noch erheblich gesteigert werden, da direkt auf Angebot und Nachfrage im Stromnetz reagiert werden kann. Die Ausgestaltung des gesamten BHKW-Systems mit Wärmespeicher, Spitzenkessel und u.U. mehreren parallel geschalteten Modulen und die Einbindung in ein Versorgungsnetz wird anhand von Simulationen optimiert.

Auslegung von Blockheizkraftwerken mit BHKW-Plan und MiniBHKW-Plan

Die Wirtschaftlichkeit eines BHKW hängt von zahlreichen Randbedingungen ab, die im vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurden. Um einen schnellen Überblick über den zu erwartenden Nutzen eines BHKW zu verschaffen, wurde das Programm MiniBHKW-Plan entwickelt, das für BHKW mit kleiner Leistung bis 100 kW_{th} eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchführt und die Brennstoffeinsparung und Schadstoffreduzierung berechnet.

Um eine zukünftig wachsende Nachfrage nach Mini-BHKW bedienen zu können und eine große Verbreitung zu erreichen, müssen Handwerker,

Heizungsbauer und Heizungsplaner in die Lage versetzt werden, Planung, Auslegung und Installation der Mini-BHKW zu übernehmen. MiniBHKW-Plan richtet sich an diese Zielgruppe und stellt dem Handwerk ein einfaches, schnelles und effizientes Instrument zur Planung und Auslegung zur Verfügung.

MiniBHKW-Plan verfügt über Datenbanken für Gebäude, Mini-BHKW-Module, Strom- und Wärmebedarf und Stromtarife, aus denen alle für das jeweilige Projekt relevanten Daten abgerufen werden können. Aufgrund des Gebäudetypes, des Heizungs- und Warmwasserbedarfs, der benötigten Prozesswärme und der Wetterdaten für die jeweilige Region bestimmt MiniBHKW-Plan Kosten und erzielbare Erlöse unter Berücksichtigung der Stromeigenutzung und der Einspeisung ins Netz, zu erreichende Betriebsstunden sowie die Schadstoffemissionen.

Berechnungen für verschiedene Module und BHKW-Systeme ermöglichen einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Konzepten, z.B. zwischen dem Einsatz eines Motor- und eines Brennstoffzellen-BHKW. MiniBHKW-Plan berechnet die Brennstoffzellen bisher näherungsweise mit gemittelten Werten für den Wirkungsgrad, es ist jedoch eine erweiterte Version in Entwicklung, die die spezifischen Eigenschaften der Brennstoffzellen detailliert berücksichtigt. Dabei werden sowohl Wirkungsgradänderungen und Änderungen des Strom-/Wärmeverhältnisses bei Teillastbetrieb, als auch die Verluste durch die Erdgasreformierung einbezogen.



Abb.11: Programm MiniBHKW-Plan

Beispielhafte Kosten aus der BHKW-Plan Datenbank

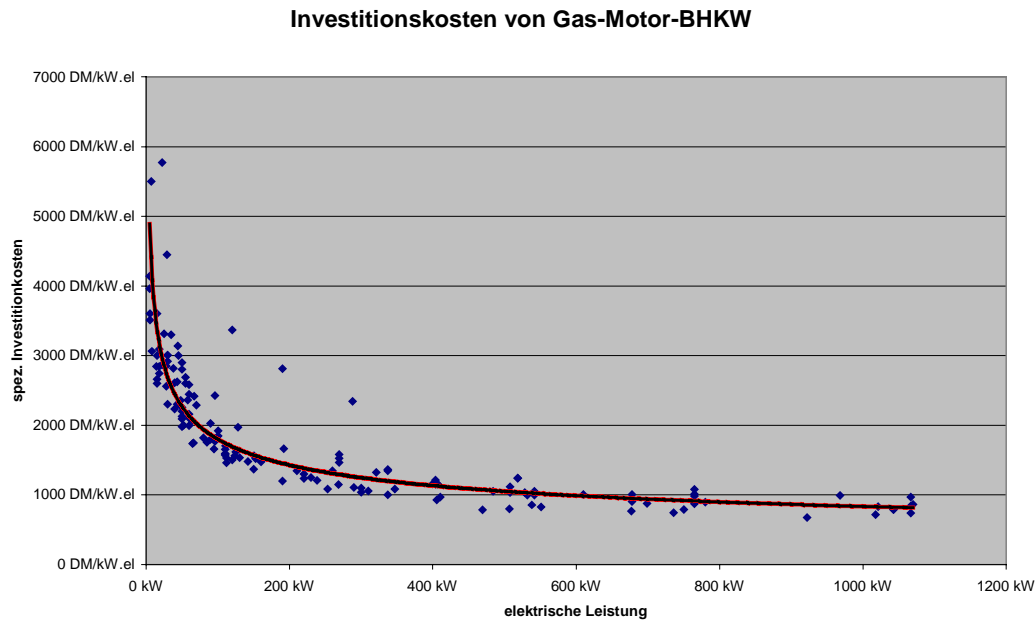


Abb.12: Investitionskosten von Gas-Motor-BHKW

Die Kosten für Brennstoffzellen-BHKW liegen außerhalb der Skalierung dieser Grafik. Man hofft, in den nächsten Jahren hier in den oberen Bereich der Motor-BHKW zu kommen.

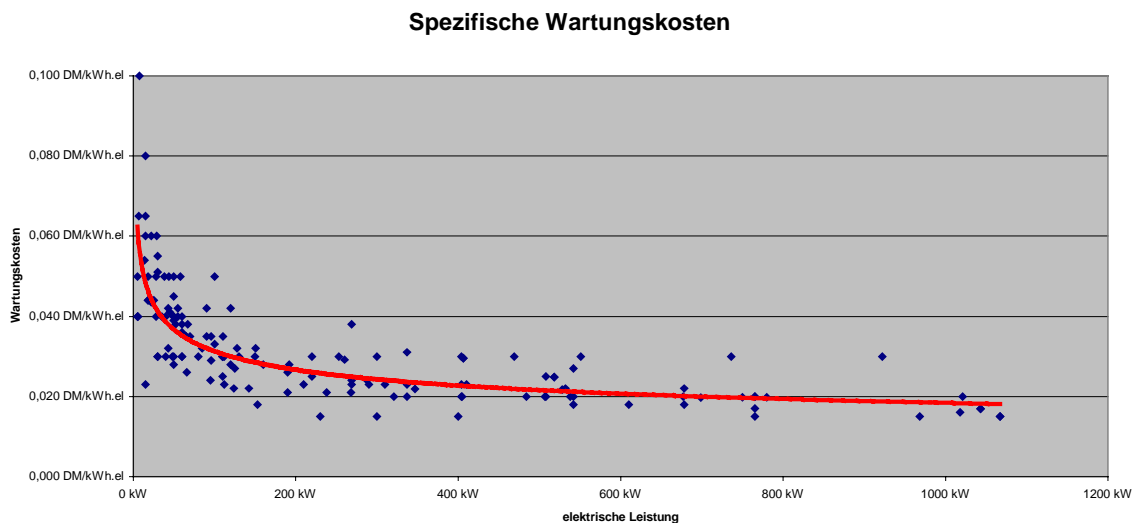


Abb.13: Spezifische Wartungskosten

Für Mini-BHKW betragen die spezifischen Wartungskosten rund 0,05 DM/kWh_{el}, so dass sich bei einer jährlichen Laufzeit von 7000 Stunden für ein Mini-BHKW mit 5,5 kW_{el} jährliche Wartungskosten von 1.925 DM ergeben. Bei einem Vollwartungsvertrag über 10 Jahre ergibt dies 19.250 DM. Dieser Betrag sollte durch eine voll entwickelte Brennstoffzelle auf jeden Fall unterschritten werden.

Vergleich eines Motor-Mini-BHKW mit Brennstoffzellen-BHKW

Für diesen Vortrag möchte ich ein Motor-BHKW (Ecopower) mit drei PEM-Brennstoffzellen aus verschiedenen Entwicklungsstufen vergleichen. Dabei werden Brennstoffzellen-BHKW zugrundegelegt, die aus heutiger Sicht in den Jahren 2002, 2010 und 2020 zur Verfügung stehen könnten. Bei allen Modulen wird die elektrische Leistung entsprechend dem Motor-BHKW Ecopower auf 4,7 kW_{el} festgelegt.

Das erste Brennstoffzellen-BHKW kann so etwa ab 2002 gebaut und verkauft werden:

Elektrische Leistung:	4,7 kW
Thermische Leistung:	7,8 kW
Elektrischer Wirkungsgrad:	30 %
Gesamt-Wirkungsgrad:	80 %
Kosten:	ca. 40.000.- DM
Wartungskosten:	0,055 DM/kWh _{el}

Das zweite Brennstoffzellen-BHKW wird man ab 2010 kaufen können:

Elektrische Leistung:	4,7 kW
Thermische Leistung:	5,3 kW
Elektrischer Wirkungsgrad:	40 %
Gesamt-Wirkungsgrad:	85 %
Kosten:	ca. 30.000.- DM
Wartungskosten:	0,055 DM/kWh _{el}

Das dritte Brennstoffzellen-BHKW ist ab 2020 zu erwarten:

Elektrische Leistung:	4,7 kW
Thermische Leistung:	4,7 kW
Elektrischer Wirkungsgrad:	45 %
Gesamt-Wirkungsgrad:	90 %
Kosten:	ca. 20.000.- DM
Wartungskosten:	0,055 DM/kWh _{el}

Diese vier Varianten werden in ein Mehrfamilienhaus mit über 1000m² Wohn-/Nutzfläche eingebaut. Das jeweilige BHKW wird durch einen 750 l Pufferspeicher und einen Spitzenkessel ergänzt.

Bei den Motor-Mini-BHKW werden erste Versuche mit monovalenter Wärmeversorgung mit einem Pufferspeicher gemacht. Leider ist die Einspeisvergütung zu gering, um diese Variante wirtschaftlich zu machen. Die Vergleichsrechnung wird mit dem Programm MiniBHKW-Plan vorgeführt.



Abb.14: Beispiel Brennstoffzellen-BHKW der Firma Vaillant



Abb.15: Beispiel Mehrfamilienhaus

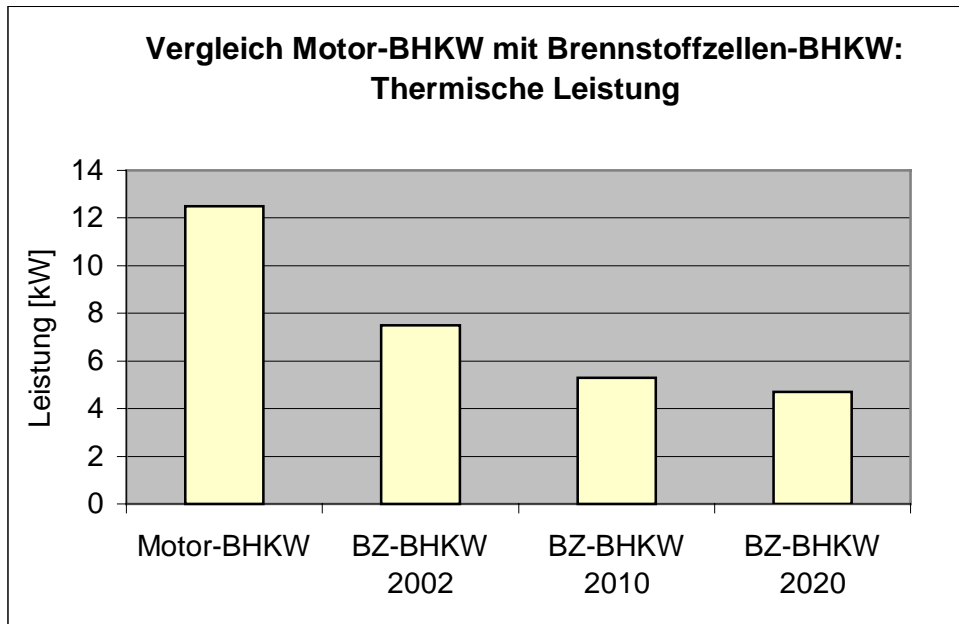


Abb.16: Leistungsvergleich Motor-BHKW und Brennstoffzellen-BHKW

Gegenüber den Brennstoffzellen-BHKW weisen Motor-BHKW wesentlich höhere thermische Leistungen auf. Abb. 16 zeigt, wie dieser Unterschied mit fortschreitendem Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-BHKW noch verstärkt wird. Dadurch erhöhen sich die Betriebsstunden der Brennstoffzellen-BHKW, wie Abb. 17 zeigt, von 6100h auf 6800h.

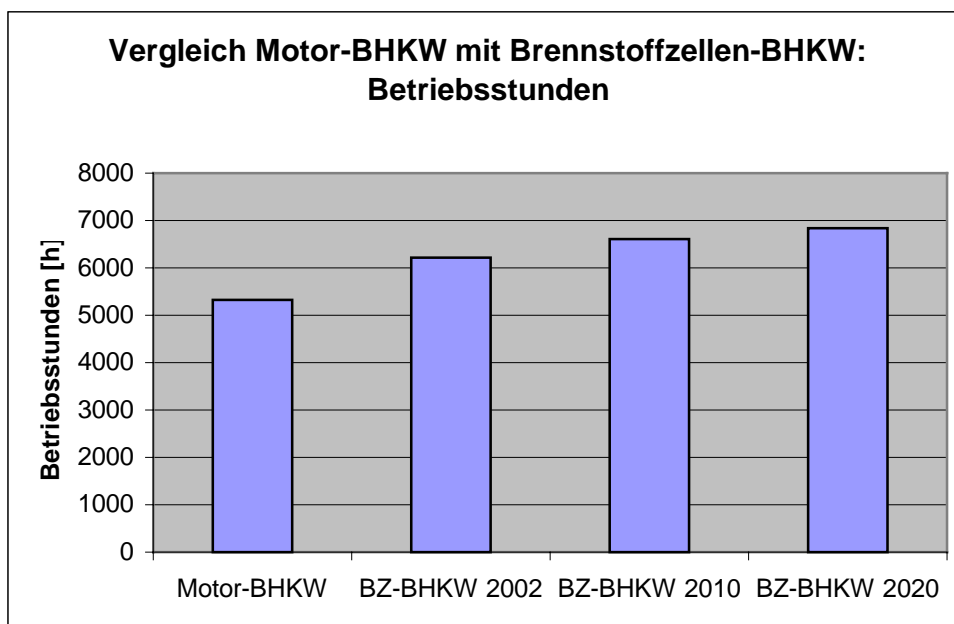


Abb. 17: Vergleich der Betriebsstunden

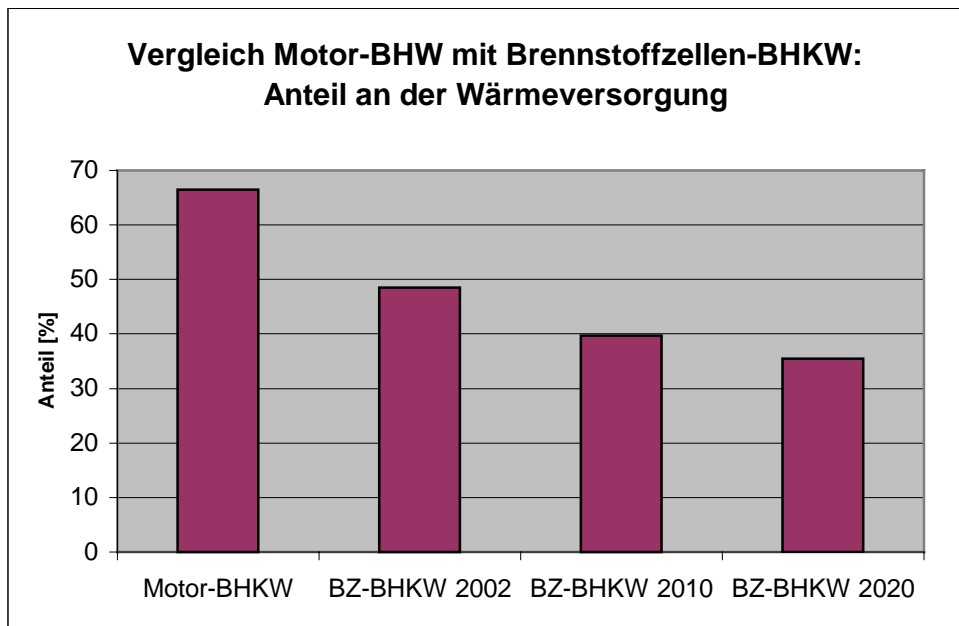


Abb. 18: Vergleich des Anteils an der Wärmeversorgung

Durch die immer geringere Wärmeleistung sinkt der Anteil der BHKW-Wärmeerzeugung am gesamten Wärmebedarf, trotz steigender Betriebsstunden. Es wird zwar immer mehr Strom erzeugt, da die elektrische Leistung gleich bleibt, aber die erzeugte Wärmemenge wird immer kleiner. Bei diesem Beispiel muss die Leistung des Spitzenkessels erhöht werden, um den Wärmebedarf decken zu können.

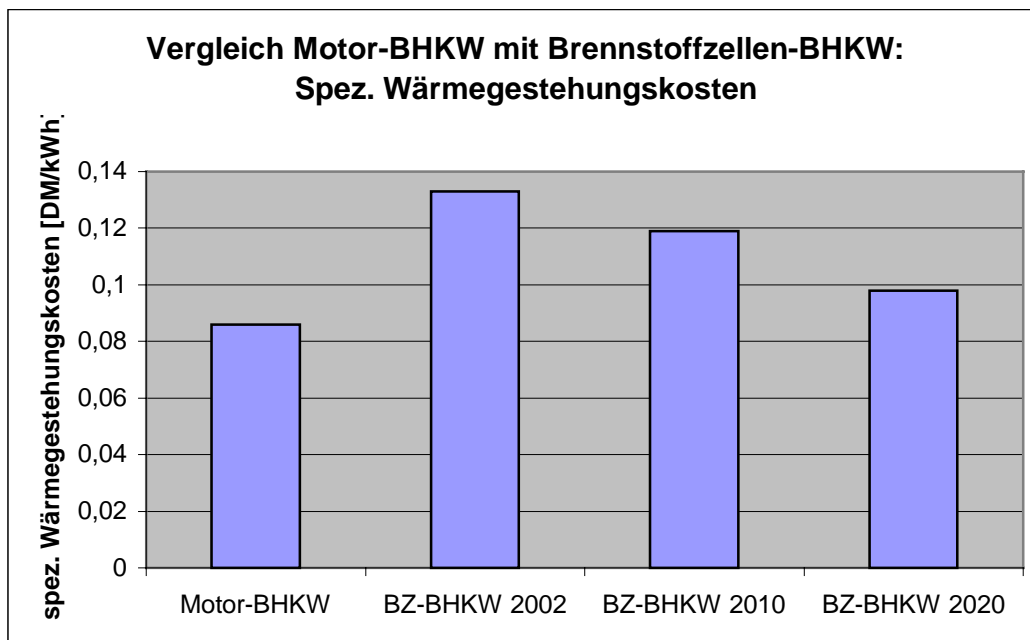


Abb. 19: Vergleich der spezifischen Wärmegestehungskosten

In diesem Beispiel ist das Motor-BHKW wirtschaftlich, weil es optimal mit unserem Programm MiniBHKW-Plan ausgelegt wurde. Die Brennstoffzellen-BHKW wurden nur zum Vergleich unter gleichen Bedingungen eingesetzt. In Realität müssen sie anders ausgelegt werden bzw. bedürfen einer entsprechenden Förderung. Abb. 19 zeigt die Wärmegestehungskosten der Brennstoffzellen-BHKW (mit Spitzenkessel). Zum Vergleich werden in Abb. 20 die Stromgestehungskosten aufgezeigt.

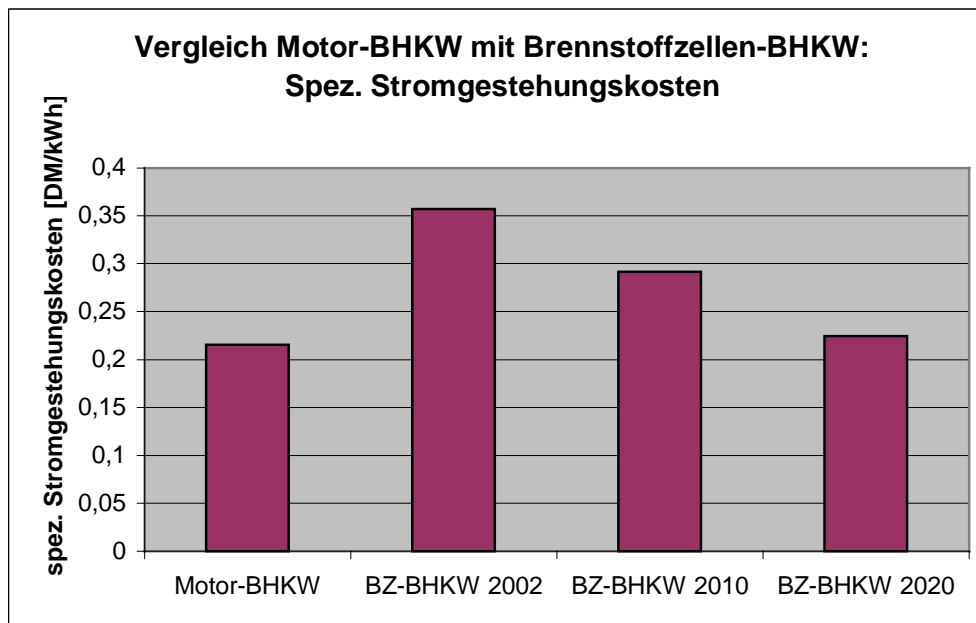


Abb. 20: Vergleich der spezifischen Stromgestehungskosten

Niedrige Strompreise beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit der BHKW, da ihre Stromgestehungskosten über den heutigen Stromkosten liegen. Für die Zukunft müssen aus Gründen des Klimaschutzes bzw. der Verringerung der Schadstoffemissionen hier die wirtschaftlichen Randbedingungen verbessert werden. Dabei sollten bis zum Jahr 2002 die besonderen Bedingungen der Brennstoffzellen-BHKW berücksichtigt werden.

Mit diesem ersten Vergleich zwischen Motor-BHKW und Brennstoffzellen-BHKW unter vorgegebenen Randbedingungen lassen sich einige typische Effekte zeigen. Wenn sich aber die Randbedingungen ändern, ergeben sich andere Verhältnisse.

Um den Einfluss der Randbedingungen zu zeigen, führen wir einen neuen Vergleich mit geänderten Randbedingungen durch und berechnen mit unserem Programm Mini-BHKW-Plan die Auswirkungen. Unser Referenzsystem ist dabei ein Brennstoffzellen-BHKW mit Erdgas aus dem Jahre 2010. Diesmal hat unser Gebäude nur eine Wohnfläche von 334 m² und ist damit wesentlich kleiner als im ersten Vergleich. Der Wärmebedarf liegt dann bei 38,4 MWh/a, der Strombedarf wird entsprechend mit 15 MWh/a angenommen. Das Brennstoffzellen-BHKW erreicht damit eine Laufzeit von 4900 Betriebsstunden, wie die Simulation mit MiniBHKW-Plan zeigt. In Abb. 21 sehen wir dazu die Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs und der Wärmeerzeugung. Der Deckungsanteil des Brennstoffzellen-BHKW am Wärmebedarf liegt dann bei 76,7 %. In diesem Fall erhalten wir unter Berücksichtigung der Ökosteuer ein jährliches Defizit von 3071 DM/a.

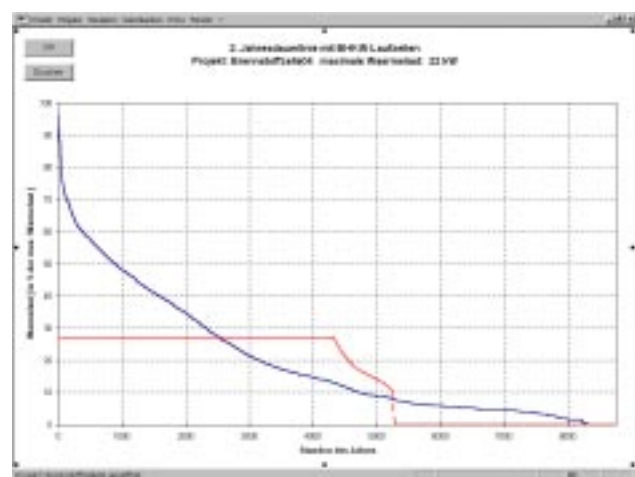


Abb. 21: Jahresdauerlinie von Wärmebedarf und Stromerzeugung eines Brennstoffzellen-BHKW

Ausgehend von diesem Fall ändern wir in sechs Schritten die Randbedingungen, wobei die vorherigen Änderungen jeweils bestehen bleiben, und berechnen Kosten und Erlöse des Brennstoffzellen-BHKW.

1. Einspeisetarif von 0,15 DM/kWh _{el} auf 0,20 DM/kWh _{el} :	Defizit	2400 DM/a
2. Kosten Brennstoffzellen-BHKW von 30.000 DM auf 20.000 DM:	Defizit	1044 DM/a
3. Einsparung Spitzenkessel durch integrierte Zusatzheizung:	Gewinn	137 DM/a
4. Senkung der Wartungskosten auf 0,04 DM/kWh _{el} :	Gewinn	368 DM/a
5. 4 % Zinsverbilligung für die Brennstoffzelle:	Gewinn	871 DM/a
6. Stromerlös von 0,2 DM/kWh _{el} auf 0,25 DM/kWh _{el} :	Gewinn	2025 DM/a

Wie wir sehen, ist die finanzielle Spanne für den Einsatz eines Brennstoffzellen-BHKW sehr groß, von einem Defizit von über 3000 DM/a bis zu einen Gewinn von über 2000 DM/a. Hier müssen für die weitere Entwicklung der Brennstoffzellen-BHKW von der Politik verlässliche politische Randbedingungen geschaffen werden. Wenn diese bestehen, sind die beteiligten Firmen ihrerseits in der Lage, auch die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu erfüllen. Damit steht Brennstoffzellen-BHKW, den effizienten Energieerzeugern der Zukunft, nichts mehr im Wege.