

Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen

Kurzbericht

Gefördert aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Projektlaufzeit 12/2009 – 11/2011
Aktenzeichen SF-10.08.18.7-09.36

Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch
Bearbeiter Raphael Lechner, M.Sc.

Die Verantwortung für die Inhalte des Berichts liegt bei den Autoren

Institut für Energietechnik IfE GmbH
an der Hochschule Amberg – Weiden
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg
Tel: ++49 9621 / 482 -3921
Fax: ++49 9621 / 482-4921
www.ifeam.de

Amberg, August 2012

1 Ziel der Forschungsaufgabe

Unter dem Druck steigender Energiekosten wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche technische Innovationen zur Verbesserung der Effizienz von Blockheizkraftwerken (BHKW) entwickelt. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von BHKW-Anlagen von bis zu 20 Jahren sind viele Bestandsanlagen jedoch noch auf einem vergleichsweise alten technischen Stand und nutzen ihr Effizienzpotential nicht voll aus. Hinzu kommt, dass aufgrund von Nutzungsänderungen oder Erweiterungen bestehender Gebäude und veränderter wirtschaftlicher und gesetzlicher Rahmenbedingungen (z. B. Brennstoffpreise, Stromeinspeisevergütungen) die ursprünglichen Erwartungen an Effizienz und Wirtschaftlichkeit nicht mehr erfüllt werden. Dies führt einerseits zu einem unnötigen Ressourcenverbrauch und CO₂-Ausstoß, andererseits zu vermeidbaren Kostenbelastungen und suboptimaler Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Ziel des Vorhabens war es daher, aufbauend auf die realen Betriebsdaten 18 typischer BHKW-Anlagen, fallspezifisch Modellkonfigurationen zur Verbesserung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit herauszuarbeiten.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Auf Basis einer Betriebsdatenerfassung in einem zwölfmonatigen Kontrollzyklus wurde der energetische und ökologische Ist-Zustand von 18 typischen Bestands-BHKW erfasst und ökologisch und ökonomisch bewertet. Darauf aufbauend wurden anlagenspezifische Modellkonfigurationen erarbeitet, die anhand von bestehenden Anlagen praxisrelevante Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen aufzeigen. Die Modellkonfigurationen wurden im Rahmen einer Vollkostenrechnung und einer CO₂-Bilanz wirtschaftlich und ökologisch bewertet. Dabei wurden für alle Anlagen standardisierte Randbedingungen, wie z. B. einheitliche Brennstoffpreise und Wartungskostenansätze, gewählt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Der Einfluss spezifischer Parameter (Brennstoffpreise, Stromgutschrift) auf die Wirtschaftlichkeit wurde anschließend anhand einer Sensitivitätsanalyse herausgearbeitet. Aus den Projektergebnissen wurden allgemein anwendbare Handlungsempfehlungen zur Verbesserung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit bestehender und neu geplanter BHKW-Anlagen abgeleitet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die für das Projekt ausgewählten Blockheizkraftwerke.

Tabelle 1: Auflistung der untersuchten BHKW-Module

Nummer	Wärmeabnehmer	Inbetriebnahme	Antriebsaggregat	Brennstoff	Feuerungsleistung in kW	Elektrische Leistung in kW	Thermische Leistung in kW	Betriebsweise	Stromnutzung
1	Öffentl. Wärmenetz	2007	Gas-Otto-Motor	Biomethan	1.990	801	942	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
2 ¹	Öffentl. Wärmenetz	2006	Gas-Otto-Motor	Biomethan	1.925	746	973	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
3 ¹	Öffentl. Wärmenetz	2006	Gas-Otto-Motor	Erdgas	2 x 1.363	2 x 526	2 x 693	wärmegeführt	Überschusseinspeisung
4	Heiz- + Prozesswärme Industrie	2007	Pflanzenöl-Dieselmotor	Pflanzenöl	565	240	220	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
5	Heiz- + Prozesswärme Industrie	1991	Gas-Otto-Motor	Erdgas	- ²	2 x 320	2x 528	wärmegeführt	Stromeigennutzung
6	Archiv / Bibliothek	2006	Gas-Otto-Motor	Erdgas	332	112	196	wärmegeführt	Stromeigennutzung
7	Öffentl. Wärmenetz	2006	Gas-Otto-Motor	Biogas	2 x 904	2 x 335	2 x 455	stromgeführt	Stromeinspeisung EEG
8 ³	Heiz- + Prozesswärme Industrie	2008 ³	Hochtemperatur-Brennstoffzelle	Erdgas	532	245	150	wärmegeführt	Stromeigennutzung
9	Verwaltungsgebäude / KWKK	2005	Gas-Otto-Motor	Erdgas	337	116	194	wärmegeführt	Stromeigennutzung
10	Haftanstalt	2008	Gas-Otto-Motor	Erdgas	148	50	80	wärmegeführt	Stromeigennutzung
11	Ausbildungs-/Schulungszentrum	2006	Gas-Otto-Motor	Erdgas	204	68	109	wärmegeführt	Stromeigennutzung
12	Öffentl. Wärmenetz	1990	Gas-Otto-Motor	Erdgas	2 x 1.382	2 x 450	2 x 793	wärmegeführt	Überschusseinspeisung
13	Hotelbetrieb	2006	Pflanzenöl-Dieselmotor	Pflanzenöl	2 x 76	2 x 25	2 x 44	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
14	Verwaltungsgebäude / KWKK	2000	Gas-Otto-Motor	Erdgas	2 x 1.200	2 x 450	2 x 620	wärmegeführt	Stromeigennutzung
15	Verwaltungsgebäude	2005	Gas-Otto-Motor	Erdgas	649	230	358	wärmegeführt	Stromeigennutzung
16	Verwaltungsgebäude	2005	Gas-Otto-Motor	Erdgas	350	120	200	wärmegeführt	Stromeigennutzung
17	Hallenbad	2006	Pflanzenöl-Dieselmotor	Pflanzenöl	475	200	160	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
18	Prozesswärme Industrie	2007	Pflanzenöl-Dieselmotor	Pflanzenöl	475	200	160	wärmegeführt	Stromeinspeisung EEG
1	verbundene Anlagen am selben Standort								
2	nicht bekannt								
3	2010 außer Betrieb genommen								

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Betriebsdatenerfassung im zwölfmonatigen Kontrollzyklus, aufgeschlüsselt nach den untersuchten BHKW-Technologien. Die Wirkungsgrade und die leistungsbezogene Stromkennzahl wurden den jeweiligen Datenblattangaben entnommen. Die Nutzungsgrade, die arbeitsbezogene Stromkennzahl die Vollbenutzungsstunden, die Primärenergieeinsparung und die CO₂-Emissionsfaktoren spiegeln dagegen das tatsächliche Betriebsverhalten im Kontrollzyklus wieder. Die Primärenergieeinsparung gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme wurde mit dem Rechenverfahren nach EU-Richtlinie 2004/8/EG bestimmt. Die CO₂-Emissionsfaktoren für Strom und Wärme wurde mit der daraus abgeleiteten Finnischen Allokationsmethode ermittelt.

Tabelle 2: Kennzahlen aus dem Kontrollzyklus als Mittelwerte aufgeschlüsselt nach Technologien

	Einheit	Gas-Otto-Motoren	Dieselmotoren	Brennstoffzelle	Gesamt
Elektrischer Wirkungsgrad	%	35,6	39,5	46,1	37,0
Elektrischer Nutzungsgrad	%	34,6	38,1	45,5	36,0
Thermischer Wirkungsgrad	%	53,8	41,8	28,2	49,7
Thermischer Nutzungsgrad	%	50,5	40,3	27,5	46,9
Gesamtwirkungsgrad	%	89,4	81,3	74,2	86,7
Gesamtnutzungsgrad	%	85,1	78,3	73,0	82,9
Leistungsbezogene Stromkennzahl	-	0,67	1,00	1,63	0,80
Arbeitsbezogene Stromkennzahl	-	0,72	1,01	1,65	0,84
Elektrische Vollbenutzungsstunden	h/a	6.321	4.743	8.089	6.069
Thermische Vollbenutzungsstunden	h/a	6.076	4.681	7.988	5.840
Deckung elektrischer Energiebedarf d. Liegenschaft	%	33,3	-	-	33,3
Deckung thermischer Energiebedarf d. Liegenschaft	%	48,2	43,5	-	47,5
Primärenergieeinsparung ggb. getrennter Erzeugung	%	23,7 ¹ 26,6 ²	26,8	23,2	24,8
CO ₂ -Emissionsfaktoren	g/kWh _{el}	420 ¹ 201 ²	350	423	368
	g/kWh _{th}	213 ¹ 110 ²	163	215	185

¹ Fossile Brenngase (Erdgas)
² Biogene Brenngase (Biomethan / Biogas)

Aufbauend auf die Ergebnisse der Datenerfassung im Kontrollzyklus wurden zwölf alternative Modellkonfigurationen entwickelt, die typische praxisrelevante Beispiele zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz von BHKW-Anlagen widerspiegeln:

KWKK 1:	Ersatz einer bestehenden Kompressionskälteanlage durch eine Absorptionskälteanlage am Beispiel der Anlage 15
KWKK 2:	Ersatz einer bestehenden Absorptionskälteanlage durch eine Kompressionskälteanlage am Beispiel der Anlage 9
Biomethan-BHKW:	Erweiterung einer bestehenden Erdgas-BHKW-Anlage um ein zusätzliches Biomethan-Modul am Beispiel Anlage 11
Satelliten-BHKW:	Erweiterung der Biogasanlage Nummer 7 um ein Satelliten-BHKW
Abgasturbine:	Nachrüstung einer Turbine zur Abgasnachverstromung am Beispiel der Anlage 4
Holzgas-BHKW:	Umstellung der BHKW-Anlage Nummer 18 von Pflanzenöl- auf Holzgasbetrieb
Brennstoffzelle:	Vergleich der Brennstoffzelle Anlage 8 mit einem konventionellen Erdgas-BHKW gleicher thermischer Leistung
Stromgeführte Anlage:	Stromgeführter BHKW-Betrieb am Beispiel der Anlage 6
BHKW-Erweiterung:	Erweiterung der Anlage Nummer 10 um ein zweites baugleiches Modul
Modernisierung 1:	Ersatz einer bestehenden Anlage mit 100 % Stromeigennutzung durch ein modernes BHKW-Modul gleicher thermischer Leistung am Beispiel der Anlage 5
Modernisierung 2:	Ersatz einer bestehenden Anlagen mit Stromeinspeisung ins öffentliche Netz durch ein modernes BHKW-Modul gleicher thermischer Leistung am Beispiel der Anlage 12
Optimierte Wartung:	Verlegung der Jahreswartung von den Winter- in die Sommermonate am Beispiel der Anlage 16

In Abbildung 1 und 2 sind die Primärenergieeinsparung und die spezifischen Energieerzeugungskosten von Ist-Zustand und Modellkonfigurationen im Vergleich dargestellt, in Tabelle 3 sind die mittleren Verbesserungen durch die Modellkonfigurationen aufgeführt.

Tabelle 3: Verbesserungen durch die Modellkonfigurationen als Mittelwerte über alle Anlagen

	Ist-Zustand	Modellkonfiguration	Prozentuale Verbesserung
Primärenergieeinsparung nach 2004/8/EG	23,8 %	25,8 %	8,4 %
CO ₂ -Emissionsfaktor Strom	393,6 g/kWh _{el}	347,9 g/kWh _{el}	11,6 %
CO ₂ -Emissionsfaktor Wärme	197,6 g/kWh _{th}	176,2 g/kWh _{th}	10,8 %
Spez. Energiegestehungskosten	4,42 Ct/kWh	4,02 Ct/kWh	9,0 %

Im Mittel lässt sich die Primärenergieeinsparung um 8,4 % steigern und die CO₂-Emissionsfaktoren für Strom und Wärme sinken um 11,6 % bzw. 10,8 %. Dies ist vor allem auf die Modellkonfigurationen mit regenerativen Brennstoffen zurückzuführen, wie z. B. das Biomethan- oder Holzgas-BHKW.

Auch aus ökonomischer Sicht stellt die Mehrheit der Modellkonfigurationen eine Verbesserung dar. Lediglich für die Modellkonfigurationen stromgeführter Betrieb und Modernisierung Beispiel 2 ergeben sich höhere Energiegestehungskosten (vgl. Abbildung 2). Beide Konfigurationen können jedoch bei veränderten Rahmenbedingungen, z. B. sinkenden Gaspreisen oder steigenden Stromgutschriften, wirtschaftlich sein. Im Mittel sinken die spezifischen Energiegestehungskosten um 0,40 Ct/kWh von 4,42 Ct/kWh auf 4,02 Ct/kWh.

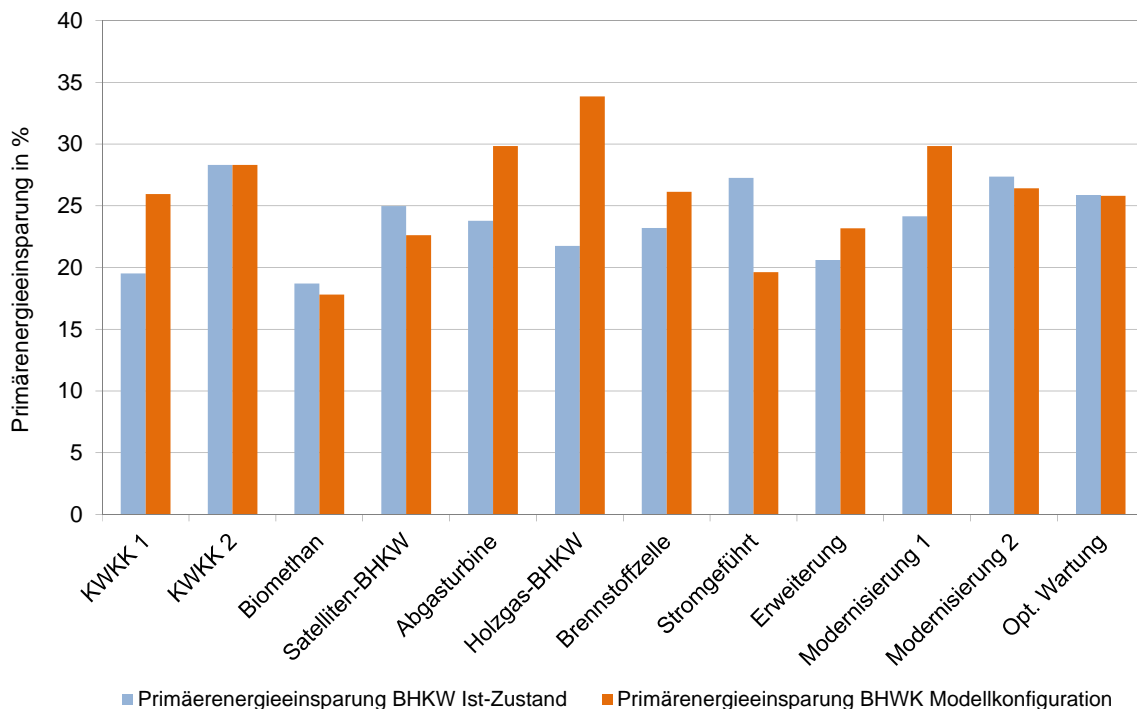


Abbildung 1: Primärenergieeinsparung für Ist-Zustand und Modellkonfigurationen

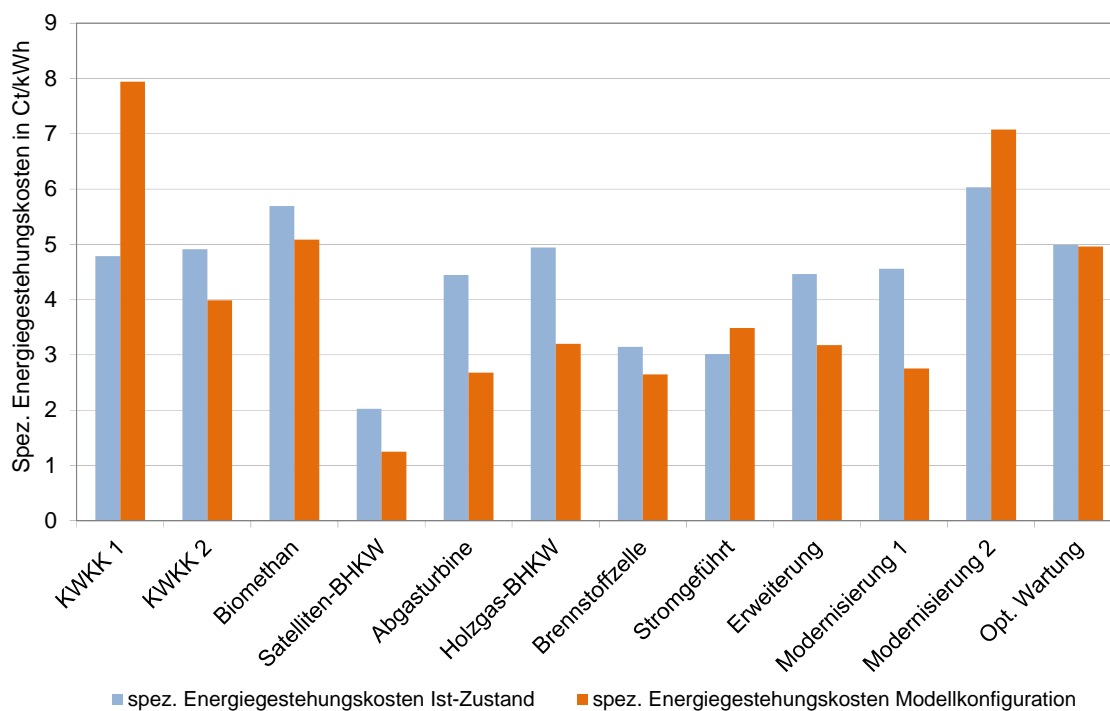


Abbildung 2: Spezifische Energiegestehungskosten für Ist-Zustand und Modellkonfigurationen

Aus den Ergebnissen der Datenerfassung im Kontrollzyklus und den Modellkonfigurationen wurden allgemeine Hinweise zur Standortwahl und Dimensionierung von BHKW-Anlagen, zur hydraulischen und regelungstechnischen Einbindung, zur Brennstoffwahl, zur Erweiterung und Modernisierung, zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung und zu alternativen KWK-Konzepten abgeleitet. Wesentliches Fazit hieraus ist, dass die korrekte Dimensionierung sowie die korrekte hydraulische und regelungstechnische Einbindung entscheidend für einen effizienten und wirtschaftlichen BHKW-Betrieb sind. Durch geschickte Anpassung der Anlagenkonfiguration an die rechtlichen Rahmenbedingungen, z. B. durch geeignete Brennstoffwahl und modularen Aufbau, lassen sich deutliche wirtschaftliche Vorteile darstellen. Aufgrund der zunehmend komplexeren rechtlichen, wirtschaftlichen und steuerlichen Fragestellungen ist in diesem Zusammenhang die Hinzunahme von Fachexperten für die Entwicklung geeigneter Systemkonfigurationen und Betreibermodelle unbedingt empfehlenswert. Für die meisten Anwendungen werden dabei heute nach wie vor Verbrennungsmotor-BHKW eingesetzt werden, während alternative BHKW-Konzepte, wie z. B. Brennstoffzellen, allenfalls für Nischenanwendungen eine Rolle spielen.

Ausgehend von den Projektergebnissen wurden im letzten Schritt Checklisten erarbeitet, in denen die wesentlichen zu beachtenden Schritte bei der Neuplanung von Blockheizkraftwerken und bei der Optimierung bestehender Anlagen zusammengefasst sind:

Checkliste BHKW-Bestandsanlagen	
1) Zuständigkeiten klären	Wer ist für welche Aufgaben (Betrieb, Datenaufzeichnung und Datenauswertung, Wartung, Einkauf, Buchhaltung,...) zuständig?
2) Vorhandene Zähler prüfen und ggf. ergänzen	Sind alle relevanten Zähler (Strom, Wärme, Brennstoff) vorhanden und funktionsbereit? Sind die Zähler für die Messaufgabe geeignet und kalibriert bzw. geeicht?
3) Datenaufzeichnung prüfen und auswerten	Werden die Zähler korrekt und regelmäßig abgelesen? Werden die Daten ausgewertet Kennzahlen zum Abgleich mit den Auslegungsdaten (Nutzungsgrade, Vollbenutzungsstunden,...) gebildet?
4) Rechtliche Rahmenbedingungen prüfen	Werden die gesetzlichen Fördermöglichkeiten (EEG, KWKG, Steuerentlastungen) voll ausgenutzt und die relevanten rechtlichen Regelungen eingehalten?
5) Serviceverträge prüfen	Werden die Wartungsarbeiten schnell und zuverlässig erledigt? Liegen die Kosten im Rahmen (Vergleich z. B. mit ASUE BHKW-Kenndaten)? Können Wartungsarbeiten selbst übernommen werden?
6) Betreibermodell prüfen	Entspricht das Betreibermodell noch den aktuellen Erfordernissen? Bringt ein Contractingmodell Vorteile? Aufgrund der komplexen wirtschaftlichen und rechtlichen Fragestellungen sollten hier Fachleute hinzugezogen werden.
7) Anlagenauslegung prüfen	Entsprechen die Betriebsdaten den ursprünglichen Zielwerten? Wird die prognostizierte BHKW-Auslastung und Verfügbarkeit erreicht?
8) Hydraulische und regelungstechnische Einbindung prüfen	Wird das BHKW vorrangig betrieben und ein evtl. vorhandener Pufferspeicher sinnvoll genutzt? Erhält das BHKW zu hohe Rücklauftemperaturen? Kann durch Optimierung von Hydraulik und Regelung die BHKW-Auslastung erhöht werden (ggf. Nachrüstung einer übergeordneten Regelung)? Entspricht die hydraulische Einbindung den Erfordernissen der Wärmeerzeuger (Reihenschaltung, Parallelschaltung)?
9) Umstellung der Betriebsweise und des Brennstoffs prüfen	Bringt eine Umstellung der Betriebsweise (wärmegeführt, stromgeführt, Mischbetrieb) oder ein Wechsel des Brennstoffs und des Stromvergütungssystems (KWKG, EEG) Vorteile?
10) Alternative Anlagenkonfigurationen prüfen	In vielen Fällen verändern sich die technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen über die Lebensdauer der BHKW-Anlage erheblich. Daher sollte periodisch geprüft werden, ob evtl. eine alternative Anlagenkonfiguration unter den aktuellen Rahmenbedingungen Vorteile bringt. Dies gilt insbesondere bei maßgeblichen Gesetzesänderungen, wie z. B. des EEG oder KWKG.

Checkliste Neuplanung von BHKW-Anlagen	
1) Ermittlung des Energiebedarfs	Ermittlung des Wärme- sowie ggf. Strom- und Kältebedarfs des zu versorgenden Objekts und der entsprechenden Lastgänge. Erstellung der thermischen Jahresdauerlinie und ggf. Jahresdauerlinien für Strom- und Kältebedarf.
2) Entwicklung des Energieversorgungskonzepts	Entwicklung verschiedener Energieversorgungsvarianten unter Berücksichtigung der räumlichen und technischen Gegebenheiten und der vorgegebenen Randbedingungen (z. B. maximale Versorgungssicherheit, möglichst geringe Investition, größtmögliche Primärenergieeinsparung,...)
3) Wirtschaftliche und ökologische Bewertung	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Vollkostenrechnung), Sensitivitätsanalyse, CO ₂ - und Primärenergiebilanz für die verschiedenen Energieversorgungsvarianten. Festlegung einer Vorzugsvariante.
4) Prüfung von Fördermöglichkeiten	Prüfung auf Fördermöglichkeiten nach EEG, KWKG und weiteren Programmen auf Bundes- und Landesebene (z. B. Impulsprogramm Mini-KWK-Anlagen).
5) Entwicklung eines Betreibermodells	Insbesondere für Betreiber, deren originäre Aufgabe nicht die Energieversorgung ist, können Contractingmodelle eine interessante Option darstellen. Aufgrund der komplexen wirtschaftlichen und rechtlichen Fragestellungen sollten für die Entwicklung von Betreibermodellen Fachleute hinzugezogen werden.
6) Technische Detailplanung	Technische Detailplanung und ggf. Ausschreibung. Bei kleinen KWK-Anlagen kann die Planung durch den Hersteller oder Installateur erfolgen, bei größeren Anlagen mit entsprechenden Investitionssummen sollte ein Fachplaner hinzugezogen werden.
7) Bauphase	Aufbau der BHKW-Anlage durch eine Fachfirma, ggf. Generalunternehmer. Die Abnahme der Bauleistungen durch einen unabhängigen Fachmann ist empfehlenswert.
8) Inbetriebnahme und Probetrieb	Probetrieb vor der endgültigen Abnahme. Überprüfung, ob die zugesicherten technischen Spezifikationen (elektrische und thermische Leistung, Verbrauch, ggf. Abgasemissionen,...) eingehalten werden. Protokollierung der Abnahmemessung als Referenz für spätere Überprüfungen.
9) Monitoring im Regelbetrieb	Engmaschige Überprüfung der Betriebsdaten v. a. in der ersten Heizperiode, um auftretende Probleme frühzeitig zu erkennen. Bei Verbrennungsmotor-BHKW empfehlen sich in der Anfangsphase Schmierölanalysen in kurzen Zeitabständen, um evtl. erhöhten Motorenverschleiß zu erkennen und die Ölwechselintervalle festzulegen.