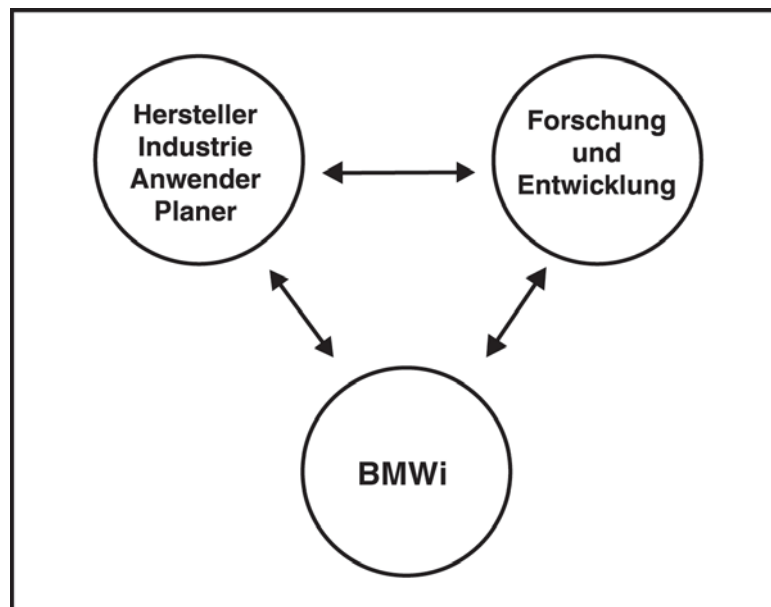


Bericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (Ffe) in Zusammenarbeit mit der TU München,
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IFE)

Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung

Abschlussbericht des Verbundprojektes



Forschungsberichte

Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung

Abschlussbericht des Verbundprojektes

Herausgeber: FIA-Projekt – Forschungs-Informationen-Austausch
unterstützt durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

im Fachinstitut Gebäude-Klima e.V.
Danziger Straße 20
74321 Bietigheim-Bissingen
Tel.: 0 71 42/5 44 98
www.fgk.de

Projekt: Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Bayerngas GmbH
E.ON Energie AG
E.ON Ruhrgas AG
RWE Fuel Cells GmbH
Vaillant GmbH
Solo Kleinmotoren GmbH
Senertec GmbH

Veröffentlicht im Januar 2008, Best. Nr.: 142

ISBN 3-938210-19-2

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung

**Messtechnische Untersuchung
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Systemvergleich und Optimierung**

in Zusammenarbeit mit:

ife Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und
Anwendungstechnik

Innovative KWK zur Hausenergieversorgung - Teil A

**Messtechnische Untersuchung
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Systemvergleich und Optimierung**

Auftraggeber:

**Stiftung Energieforschung
Baden-Württemberg
Bundesministerium für Wirtschaft
und Arbeit
Bayerngas GmbH
E.ON Energie AG
E.ON Ruhrgas AG
RWE Fuel Cells GmbH
Vaillant GmbH
Solo Kleinmotoren GmbH
Senertec GmbH**

FfE-Auftragsnummer:

511.03

Bearbeiter/in:

**Ulli Arndt
Dietmar Kraus
Serafin von Roon
Wolfgang Mauch**

Fertigstellung:

November 2007

Impressum:

Endbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

Das diesem Bericht zugrunde liegende
Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Wirtschaft und
Technologie unter dem Förderkennzeichen
03273359A gefördert. Die Verantwortung für
den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim
Autor.

zum Projekt:

Innovative KWK zur Hausenergieversorgung -
Teil A

Messtechnische Untersuchung
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Systemvergleich und Optimierung

Auftraggeber:

Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Bayerngas GmbH
E.ON Energie AG
E.ON Ruhrgas AG
RWE Fuel Cells GmbH
Vaillant GmbH
Solo Kleinmotoren GmbH
Senertec GmbH

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dipl.-Phys. R. Corradini

1 Problemstellung und Zielsetzung	1
2 Methodik.....	3
2.1 Vorgehensweise	3
2.2 Definitionen.....	4
3 Umfeld der KWK	9
3.1 KWK-Technologien	9
3.1.1 Motorische BHKW	9
3.1.2 Mikro-Gasturbinen.....	11
3.1.3 Brennstoffzellen	14
3.1.4 Stirling-Motoren.....	16
3.1.5 Sonstige Anlagenkonzepte	18
3.1.6 KWK-Anlagen in der Übersicht.....	19
3.2 Normative Rahmenbedingungen der KWK	20
3.2.1 Energiewirtschaftsgesetz	20
3.2.2 KWK-Gesetz.....	21
3.2.3 Ökologische Steuerreform.....	25
3.2.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz	27
3.2.5 Emissionshandel	28
3.2.6 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BimSchG)	29
3.2.7 Verordnungen über den wärmetechnischen Standard von Gebäuden	32
3.2.7.1 Wärmeschutzverordnung `95 / Heizanlagenverordnung.....	32
3.2.7.2 Energie-Einsparverordnung	33
3.3 Ökonomische Rahmenbedingungen der KWK.....	36
3.3.1 Gesamtannuität.....	37
3.3.2 Kosten	37
3.3.2.1 Kapitalgebundene Kosten.....	37
3.3.2.2 Verbrauchsgebundene Kosten	40
3.3.2.3 Betriebsgebundene Kosten.....	40
3.3.2.4 Sonstige Kosten	41
3.3.3 Erlöse	41
3.3.3.1 Kapitalgebundene Erlöse.....	41
3.3.3.2 Verbrauchsgebundene Erlöse	41
3.3.3.3 Betriebsbedingte Erlöse.....	42
3.4 Rahmenbedingungen für den Einsatz von KWK-Anlagen zur Hausenergieversorgung	42
3.4.1 Nutzung der Koppelprodukte im Versorgungsobjekt.....	43
3.4.2 Varianten zur Nutzung des KWK-Stroms	44
3.4.2.1 Volleinspeisungsmodell	44

3.4.2.2	Allgemeinstrom-Modell.....	46
3.4.2.3	Betreiber-Modell.....	47
3.4.3	Zusammenfassung der KWK-Einsatzbedingungen zur Hausenergieversorgung	49
4	Messtechnische Untersuchungen.....	50
4.1	Prüfstand zur messtechnischen Untersuchung von KWK-Systemen	50
4.2	Definition des Typgebäudes	51
4.2.1	Statistische Daten zur Gebäudeauslegung	51
4.2.2	Gebäudephysik.....	52
4.2.3	Lastgänge für Heizung, Warmwasser und Strom	53
4.2.3.1	Heizwärmebedarfslastgänge	53
4.2.3.2	Warmwasserbedarfslastgänge	53
4.2.3.3	Strombedarfslastgänge.....	55
4.2.4	„Sonderfall“ Mikro-Gasturbine.....	57
4.2.5	Übersicht der skalierten Typgebäude	58
4.3	Zusammenfassung der messtechnischen Untersuchungen am KWK-Prüfstand ...	61
4.4	Messung einer Mikro-Gasturbine von Capstone im Praxiseinsatz	63
4.4.1	Einsatz der Mikro-Gasturbine	63
4.4.2	Regelung der Mikro-Gasturbine.....	63
4.4.3	Systembeschreibung	64
4.4.4	Messungen	65
4.4.4.1	Messaufbau.....	65
4.4.4.2	Durchführung der Messungen	69
4.4.4.3	Messergebnisse	70
5	Vergleich der KWK-Systeme mit getrennter Energieversorgung.....	77
5.1	Methodik und Randbedingungen des Systemvergleichs	77
5.2	Basisdaten	78
5.3	Varianten der getrennten Energieversorgung.....	79
5.3.1	Varianten der Wärmeversorgung.....	79
5.3.1.1	Aktueller Bestand zur Wärmeerzeugung	80
5.3.1.2	Beste verfügbare Technik zur Wärmeerzeugung: Erdgas-Brennwertgeräte.....	84
5.3.2	Varianten der Stromversorgung.....	85
5.3.2.1	Verdrängungsmix durch die Einspeisung von KWK-Strom	85
5.3.2.2	Stromerzeugungsmix in Deutschland	89
5.3.2.3	Beste verfügbare Technik zur Stromerzeugung: Gas- und Dampf-Kraftwerke ...	90
5.3.3	Zusammenfassung und Kombinationsmöglichkeit der Referenzvarianten	91
5.4	Primärenergie und Emissionen	92
5.4.1	Primärenergie- und Emissionsvergleich der gemessenen KWK-Systeme	92
5.4.2	Primärenergie- und Emissionsvergleich „leistungsgleicher“ KWK-Systeme.....	96

5.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse	98
5.5.1 Kennwerte der Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	98
5.5.1.1 Energiegestehungskosten	98
5.5.1.2 Kapitalwertmethode und Amortisation	99
5.5.1.3 Interner Zinsfuß.....	99
5.5.2 Wirtschaftlichkeit der KWK-Systeme.....	99
5.5.2.1 Grunddaten	99
5.5.2.2 Jahreskosten.....	101
5.5.2.3 Energiegestehungskosten	104
5.5.2.4 Amortisation	105
5.5.2.5 Sensitivität der Strom- und Gaspreisentwicklung	106
5.5.2.6 Sensitivität der Investitionskosten und der Einspeisevergütung	109
5.6 Zusammenfassung des Systemvergleichs	110
6 Simulation von KWK-Systemen	112
7 Zusammenfassung und Fazit	114
8 Literaturverzeichnis	117

ENERGIEWIRTSCHAFT UND ANWENDUNGSTECHNIK

LEHRSTUHL IM INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK, TU MÜNCHEN · LEHRSTUHLINHABER: UNIV. PROF. DR.-ING. U. WAGNER, ORDINARIUS

Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung – Teil B

Endbericht der messtechnischen Untersuchungen und Quervergleiche

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE)

Technische Universität München

Ordinarius Univ. Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Auftraggeber:

**Forschungsstelle für
Energiewirtschaft e.V.**

Bearbeiter:

**Dipl.-Ing. H. Mühlbacher
Dr.-Ing. B. Geiger, München
Dr.-Ing. P. Tzscheuschler**

Fertigstellung:

November 2007

1	Aufgabenstellung	1
2	Prüfstand für KWK-Anlagen	1
3	Festlegungen zur Quervergleichsprüfung von KWK-Anlagen	11
3.1	Referenzgebäude – Rahmendaten und Festlegungen	11
3.2	Referenztage für den Betrieb bei Heizung und Warmwasserversorgung	13
3.3	Lastprofile Heizung	13
3.4	Lastprofil Warmwasser	14
4	Validierung des Prüfstands und erste Messungen	16
4.1	Stationäre Versuche	16
4.2	Kalt- und Warmstartversuche	17
4.3	Instationäre Versuche	19
5	Prüfstandsversuche	23
5.1	Senertec Dachs S 18	23
5.1.1	Technische Daten und Systemeinbindung	23
5.1.2	Messtechnische Untersuchungen	24
5.2	ecopower	46
5.2.1	Technische Daten und Systemeinbindung	46
5.2.2	Messtechnische Untersuchungen	48
5.3	solo 66	
5.3.1	Technische Daten und Systemeinbindung	66
5.3.2	Messtechnische Untersuchungen	67
5.4	Vaillant Brennstoffzelle Euro 2	83
5.4.1	Technische Daten und Versuchsaufbau	83
5.4.2	Messtechnische Untersuchungen	84
6	Prüfstandsanalyse und Hochrechnung der KWK-Anlagenjahresbilanz	96
6.1	Einfluss von Prüfstand und Speicherenergie – Verlust- und Bilanzbereinigung	96
6.2	Saisonale Deckungsanteile der KWK-Module mit Spitzenlastkessel	102
6.2.1	Senertec	102
6.2.2	ecopower	103
6.2.3	Solo	105
6.2.4	Brennstoffzelle	107
6.3	Gegenüberstellung der untersuchten KWK-Systeme	110
6.4	Quervergleiche leistungsgleicher KWK-Module mit Spitzenlastkessel	112
7	Zusammenfassung und Folgerungen	115
8	Literatur	116

Innovative KWK zur Hausenergieversorgung - Teil A

**Messtechnische Untersuchung
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Systemvergleich und Optimierung**

1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Bereich der Wohngebäude ist in Deutschland die getrennte Versorgung mit Strom und Wärme der Regelfall. Dabei wird in den meisten Fällen der Strom von einem Energieversorgungsunternehmen bezogen und die benötigte Wärme für die Raumheizung und Warmwasserbereitung mit Standard-, Niedertemperatur- bzw. Brennwertkesseln erzeugt.

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen im hohen Leistungsbereich (MW bis GW) werden derzeit meistens in der Industrie oder zur Fernwärmeversorgung eingesetzt. Kleinere, meist verbrennungsmotorische Anlagen kommen in öffentlichen und Verwaltungsgebäuden, Schwimmbädern, Hotels und großen Wohngebäuden aber auch auf Deponien und in Kläranlagen zur Anwendung.

Durch die Marktreife neuer Techniken und die Entwicklung von Anlagen mit kleinsten Leistungen ist die verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auch in Wohngebäuden eine denkbare Option. Jedoch sind eine energetische Bewertung und der Vergleich verschiedener KWK-Techniken aufgrund der Spannweite der Leistungsgrößen, der verschiedenen Einsatzbedingungen und der unterschiedlichen Marktreife nur schwer möglich. Zurzeit stehen zur Bewertung der KWK-Anlagen die Betriebserfahrungen von konkreten Anwendungsbeispielen und die technischen Angaben der Hersteller zur Verfügung. Diese lassen jedoch keine ausreichenden Aussagen über die Praxistauglichkeit, Wirtschaftlichkeit und die tatsächliche energetische Effizienz zu. Eine energiewirtschaftliche Betrachtung der kompletten KWK-Systeme erfolgt nicht.

Deshalb wurde das Forschungsvorhaben „Innovative KWK-Techniken zur Hausenergieversorgung“ mit Förderung der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit initiiert. Als Projektpartner konnten die Energieversorgungsunternehmen Bayerngas (München), E.ON Energie (München), E.ON Ruhrgas (Essen) und RWE Fuel Cells (Essen) sowie die Anlagenhersteller PowerPlus Technologies (Remscheid), SenerTec (Schweinfurt), SOLO Stirling (Sindelfingen) und Vaillant (Remscheid) gewonnen werden. Die Bearbeitung erfolgt an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) der TU München. Die Arbeiten der Forschungsstelle sind in diesem Teilbericht A, die Arbeiten des IfE im Teilbericht B beschrieben.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Durchführung von messtechnischen Untersuchungen an KWK-Systemen unter Vorgabe reproduzierbarer, praxisnaher Einsatzbedingungen aus dem Haushaltssektor. Für diesen Bereich bieten sich verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke, Stirling-Motoren, Brennstoffzellen und ggf. auch Mikro-Gasturbinen als technische Optionen für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in Mehrfamilienhäusern an. Nach der Auswertung der Messungen steht eine belastbare Datenbasis als Ergebnis der Untersuchungen zur Verfügung, mit deren Hilfe ein Vergleich der KWK-Systeme untereinander sowie eine primärenergetische Beurteilung mit getrennter Energieversorgung möglich sind.

Des Weiteren sollen durch eine gezielte Variation relevanter Betriebs- und Anlagenparameter die Potenziale für eine Optimierung der KWK-Systeme hinsichtlich des Betriebsverhaltens und der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt werden.