



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

IEA ECBCS ANNEX 42 ,FC+GOGEN-SIM'

THE SIMULATION OF BUILDING-INTEGRATED FUEL CELL AND OTHER COGENERATION SYSTEMS

PROJEKT SCHWEIZ

Jahresbericht 2007

Autor und Koautoren	V. Dorer, Empa Building Technologies
beauftragte Institutionen	Empa, EPFL-LENI, Siemens Schweiz AG, Hексis AG
Adresse	Empa, Überlandstr. 129, 8600 Dübendorf
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 823 42 75, viktor.dorer@empa.ch , www.empa.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	151 043
BFE-Projektleiter	Dr. Ch. Filleux
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Mai 2004 bis 31. März 2008
Datum	16. Nov. 2007

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des IEA Annex 42 war es, Simulationsmodelle für Brennstoffzellengeräte und anderen Mikro-WKK-Geräte für Wohngebäude zu entwickeln, diese anhand von Messungen zu verifizieren und zu kalibrieren, sie in Gebäudesimulationsprogramme zu integrieren und damit verschiedenste Systeme und Fälle zu evaluieren. Dadurch soll die Entwicklung von solchen Systemen vorangetrieben werden können.

Die meisten Arbeiten und Berichte des Annex 42 können bis Ende 2007 planmäßig abgeschlossen werden. Viele der Annex Reports sind fertig gestellt und veröffentlicht, siehe www.cogen-sim.net. Der zusammenfassende Final Report mit CD steht zum Projektende im März 2008 zur Verfügung.

Im Subtask A des IEA Projektes wurden für Europa und Nordamerika typische Bedarfsprofile für Warmwasser und Haushaltstrom als 5- und 15-min Werte erstellt.

Im Subtask B wurden Spezifikationen für die Modellierung der einzelnen Typen von Mikro-WKK-Geräten entwickelt, und die Modelle in Gebäudesimulationsprogramme wie *ESP-r*, *TRNSYS* und *EnergyPlus* implementiert und getestet. Die Modelle wurden für eine Reihe von Geräten mit Messdaten kalibriert und validiert. Dazu wurden an verschiedenen teilnehmenden Institutionen Labortests an Geräten durchgeführt. Die Schweizer Beiträge befassten sich einerseits mit den Modellen für Brennstoffzellengeräte und andererseits für Stirling- und Gasmotor-Geräte, sowie mit der Implementierung aller Modelle in *TRNSYS*. Resultate aus Labormessungen von *Hексис* und *Empa* flossen dazu ein.

Im Subtask C wurden verschiedene Systeme bezüglich Energie, Emissionen und Kosten evaluiert und daraus Hinweise für geeignete Anwendungsgebiete und Konfigurationen von solchen Geräten abgeleitet. Dazu wurde eine umfassende Methodik erstellt. Die Studien sind einzeln als Annex Reports veröffentlicht. Zudem wurden vertieft Regelungsaspekte und Optimierungsmethoden behandelt.

Projektziele

Das **generelle Ziel** des IEA Annex 42 war es, Simulationsmodelle für Brennstoffzellengeräte und anderen Mikro-WKK-Geräte zu entwickeln, diese anhand von Messungen zu verifizieren und zu kalibrieren, sie in Gebäudesimulationsprogramme zu integrieren und damit verschiedenste Systeme und Fälle zu evaluieren, um damit sinnvolle Einsatzbereiche für Mikro-WKK-Geräte für Wohngebäude und Gebäude mit ähnlicher Nutzung definieren zu können. Dadurch soll die Entwicklung von solchen Systemen vorangetrieben werden können.

Ziele des **Subtask A** (ST A) waren die Erstellung einer Technologieübersicht und die Zusammenstellung von Bedarfsprofilen für Haushaltstrom und für Brauchwarmwasser. Ziel des **Subtask B** (ST B) war es, Modelle zu entwickeln, diese in bestehende Gebäudesimulationsprogramme zu implementieren, und anhand von gemessenen Leistungsdaten von Geräten und Systemen zu kalibrieren und zu verifizieren. Ziel des **Subtask C** (ST C) war es, mittels dieser Modelle verschiedene Systemkonfigurationen zu simulieren und anhand einer generellen Methodologie bezüglich Energie, Emissionen und Kosten zu evaluieren, und daraus Hinweise für den optimalen Einsatzbereich von solchen Geräten abzuleiten [1].

Das vorliegende Projekt beinhaltet die Schweizer Teilnahme am IEA Annex 42.

Ziele des Schweizer Projektes für das Jahr 2007 waren (beteiligte Partner in Klammern):

- ST A: Beitrag zum Annex Report über Bedarfsprofile (*Empa, Siemens*).
- ST B: Dokumentation der Messungen an Mikro-WKK Geräten (*Hexis, Empa*). Implementierung der Modelle für Brennstoffzellengeräte (SOFC und PEMFC) sowie für Verbrennungsmotoren- und Stirling-Geräte in *TRNSYS* und teilweise *Matlab* (*Empa, EPFL, Siemens*), Testen und Validierung dieser Modelle und Kalibrierung der Input-Daten für die verschiedenen untersuchten Geräte (*Empa, EPFL*). Dokumentation der Arbeiten in den entsprechenden Annex Reports (Alle).
- ST C: Erstellen eines ‚State-of-the-art‘ Reports (*Empa*). Dokumentation der Methodik für die durchzuführenden Systemevaluationen (*Empa*). Durchführen der ‚Performance Assessment‘ – Studie (*Empa*) und der Multikriterien-Optimierung (*EPFL*), sowie Entwicklung von optimierenden Regelalgorithmen (*Siemens, EPFL*).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ST A

Auf der Basis des IEA SHC Annex 26 Generators wurden Daten für Warmwasserbedarfsprofile für verschiedene Bedarfsniveaus in 5-min und 15-min Schritten erstellt, und gezeigt, dass diese Profile gut mit national erhobenen Daten übereinstimmen. Europäische elektrische Bedarfsprofile wurden aus Messungen des elektrischen Bedarfes in 80 Gebäuden in UK erstellt. Für Nordamerika werden Profile eingesetzt, die mit dem detaillierten Stochastic Electric Load Generator des NRC erstellt und mit Messdaten von *HydroQuebec* verglichen wurden. Die Arbeiten sind im Annex Report dokumentiert [2]. Die entsprechenden Datenfiles sind auf der Annex 42 home page [1] verfügbar. Sie werden auch auf der dem Annex Final Report beigefügten CD enthalten sein.

ST B

Das folgende generelle Vorgehen wurde für die Entwicklung der Modelle angewendet: (a) Spezifikation, (b) Implementierung in den verschiedenen Gebäudesimulationsprogrammen, (c) vergleichende Tests auf der Basis einer strukturierten Methodologie (comparative tests), (d) Kalibrierung für spezifische Geräte/Produkte anhand von Messdaten und Herstellerangaben, (e) Validierung dieser kalibrierten Modelle anhand von Messdaten.

Die Modell-Spezifikationen für Brennstoffzellengeräte (SOFC und PEMFC) sowie für Verbrennungsmotoren- und Stirling-Geräte sind dokumentiert in [3]. Die entsprechenden vergleichenden Tests und die Validierungsarbeiten an den in den verschiedenen Gebäudesimulationsprogrammen implementierten Modellen sind dokumentiert in [4].

Im Rahmen des Annex 42 wurden Labormessungen an verschiedenen Geräten durchgeführt. Eine Übersicht gibt Tabelle 1. Die Messungen und die damit durchgeföhrten Kalibrierungsarbeiten sind beschrieben im Annex Report [5].

Institution / Land	Gerätetyp / Hersteller siehe Abkürzungen	Mess-Umgebung
FfE, Deutschland	ICE / PowerPlus ICE / SenerTec SE / SOLO PEMFC / Vaillant	Stationäre und dynamische Messungen nach Bedarfsprofilen, im Labor
ENEA/ENEL, Italien	PEMFC / HPower SE / SOLO MGT / Capstone ICE / Aisin	Testgebäude, Labormessungen
Uni Sannio, Italien	ICE / Aisin	Tests abgeschlossen, Messdaten nur beschränkt brauchbar
NRC/NRCan, Kanada	SOFC / FCT SE / WhisperGen	Detaillierte Messungen in Messgebäude mit simulierter Nutzung
NFCRC, USA	PEMFC / Plug Power	Hochaufgelöste Labormessungen
NIST, USA	PEMFC, Plug Power PEMFC, IdaTech SOFC, Acumentrics ¹⁾	Labormessungen ¹⁾ Messungen geplant
NREL, USA	PEMFC / Plug Power	Labormessungen
PSU, USA	SOFC / FCT	Labormessungen geplant
Uni Leuven, Belgien	ICE / Senertec SE / WhisperGen	Labormessungen
Uni Liège, Belgien	SOFC / FCT	Erste Messungen in bewohntem EFH
Hexis, Schweiz	SOFC / Hexis	Labor- und Feldmessungen
Empa, Schweiz	ICE / Senertec	Statische und dynamische Messungen, 2000

Tab. 1 Liste der im IEA Annex 42 durchgeführten Messungen sowie weiterer für die Modellierung benutzter Datensätze (Abkürzungen siehe Anhang)

ST C

Der in Form einer Annotated Bibliography abgefasste State-of-the-art Bericht über bestehende Evaluationen und Feldtests ist als Annex Report publiziert [6].

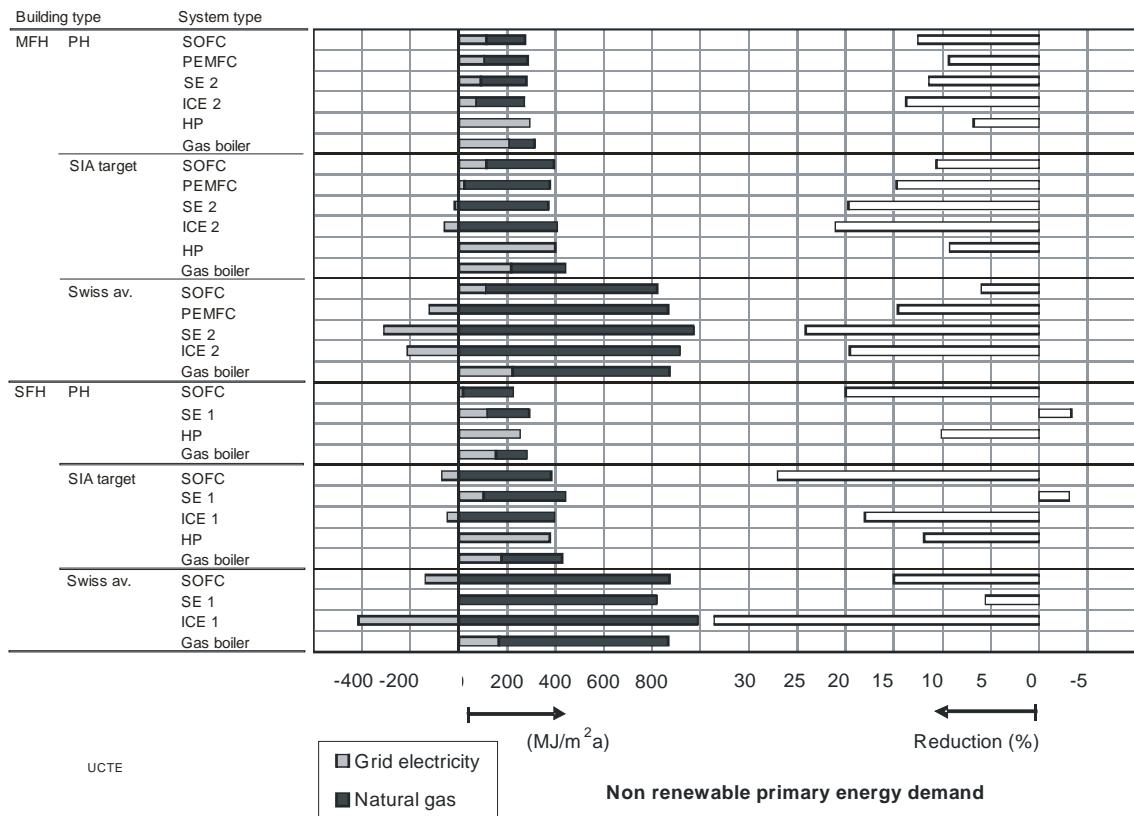
Die Methodik für die nationalen „Performance assessment-“ Studien und -Evaluationen ist ebenfalls als Annex Report publiziert [7].

Hauptteil der Arbeiten im ST C betrafen die einzelnen „Performance Assessment-“ Studien. Diese Studien werden einzeln als Annex Reports publiziert [8,9,10,11,12]. Diese Berichte sollen bis Ende 2007 fertig gestellt sein.

Mit der Anwendung von Mikro-WKK Systemen unter Schweizer Verhältnissen hat sich die Empa befasst [12]. Systeme mit einem SOFC-, einem PEMFC-, zwei ICE- und zwei SE- Geräten wurden für eine Jahresperiode simuliert und der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie (NRPE) und die CO₂ Emissionen ausgewiesen. Ein EFH und ein MFH mit je drei verschiedenen Energie-Standards, im Annex 42 definierte Bedarfsprofile für Haushaltstrom und Warmwasser [2] und drei verschiedene Strom-Mix (Europa UCTE, Schweiz inkl. Import, CCP) wurden berücksichtigt, und verglichen mit einer traditionellen Versorgung mit Gas-Brennwertkessel und Netzstrom. Zusätzlich wurden Systeme mit erdgekoppelter Wärmepumpe mit untersucht.

Figur 1 zeigt beispielhaft die Resultate bezüglich dem Jahresbedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie für die untersuchten Systeme für den Strommix „Europa UCTE“.

Zusätzlich wurden mit Sonnenkollektoren gekoppelte Systeme analysiert und die Einflüsse von Speichergröße, von der Leistungsklasse der Mikro-WKK-Geräte und von Regelparametern quantifiziert.



Figur 1: Jährlicher Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie (MJ/m².a) (für Erdgas und Netzstrom) für die untersuchten Gebäude (Passivhaus, SIA Zielwert und Durchschnitt CH) und Systeme, sowie entsprechende Reduktion in % im Vergleich zum Referenzfall mit Gas-Brennwertkessel und Netzstrom. Strom-Mix Europa UCTE. (Quelle: [12]).

FINAL REPORT

Die Resultate des Annex 42 sollen in einem Final Report zusammengefasst werden, der zusammen mit einer CD, auf der die einzelnen Annex Reports und die Datenfiles der Lastprofile enthalten sind, herausgegeben wird.

Nationale Zusammenarbeit

Bei Siemens konnten die Arbeiten des Annex in einem Industrieprojekt weitergeführt werden. Zudem wurden die Arbeiten an Clima2007 Kongress präsentiert [13]. Auch an der EPFL wurden weitergehende Arbeiten zur Auslegung und Optimierung von Heizsystemen unter Einbezug von Mikro-WKK durchgeführt. Ebenso wurden die Arbeiten an der modellbasierten optimalen Regelung zusammen mit Siemens fortgeführt, und an den gleichen Beispielgebäuden wie in der PA-Studie demonstriert. Zudem wurden ein einfacheres PEMFC Modell mit den Messdaten aus dem Annex kalibriert. Hexis und Empa planten zwischenzeitlich eine Publikation von Resultaten aus den Hexis Feldversuchen. Es wurde dann aber beschlossen, diese nicht zu veröffentlichen, da sie nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln. Ein abschliessendes Treffen des Schweizer Projekt-Teams ist für das erste Quartal 2008 geplant.

Internationale Zusammenarbeit

Die Liste der am Annex 42 partizipierenden Institutionen ist im Anhang gegeben. Interessant war zudem der Kontakt mit dem UK Carbon Trust [14], der umfangreiche Feldversuche mit Mikro-WKK-Geräten durchführt. Die im Annex 42 entwickelten Modelle fliessen auch in die Arbeiten im EU Projekt GenFC über Brennstoffzellenmodellierung [15] und im EU Projekt PolySMART über Polygeneration-Anlagen kleiner und mittlerer Grösse [16] ein.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Die meisten Arbeiten und Berichte des Annex 42 können bis Ende 2007 planmäßig abgeschlossen werden. Viele der Annex Reports sind schon fertig gestellt und veröffentlicht [1]. Die restlichen Reports werden auch bis Ende 2007 fertig gestellt sein. Der Text des zusammenfassenden Annex 42 Final Report wurde im Nov. 2007 dem ExCo vorgestellt. Die Fertigstellung wird einem professionellen Büro übergeben. Die *Micro-Cogen'08* Konferenz, im April 2008 in Ottawa, soll als Abschluss-Veranstaltung des Annex 42 dienen. Bis dann soll auch der Final Report zur Verfügung stehen.

Die restlichen Arbeiten bis zum Abschluss des Projektes betreffen die Umsetzung der Resultate und das Estellen des Final Reports, der Konferenzbeiträge sowie weiterer wissenschaftlichen Publikationen.

Referenzen

- [1] IEA Annex 42 FC+COGEN-SIM. Beschreibungen und Dokumente des IEA Annex 42 sind einsehbar auf der home page des Annex: www.cogen-sim.net
- [2] Knight I., Kreutzer N., Manning M., Swinton M., Ribberink H. *Residential Co-generation Sys-tems: European and Canadian Residential non-HVAC Electric and DHW Load Profiles*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [3] Beausoleil-Morrison, I. and Kelly, N. (eds.), *Specifications for Modelling Fuel Cell and Combustion-Based Residential Cogeneration Device within Whole-Building Simulation Programs*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [4] Beausoleil-Morrison I., Ferguson A. (eds.) *Inter-model Comparative Testing and Empirical Validation of Annex 42 Models for Residential Cogeneration Devices*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [5] Beausoleil-Morrison I. (ed). *Experimental Investigation of Residential Cogeneration Devices and Calibration of Annex 42 Models*. IEA/ECBCS Annex 42 Report
- [6] Dorer V. *Review on Existing Residential Cogeneration Systems Evaluations*. IEA Annex 42 Report, 2007
- [7] Dorer V., Weber A. *Methodology for the Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [8] Ribberink H., Bourgeois D., Mottillo M. *Performance Assessment of Prototype Residential Cogeneration Systems in Single Detached Houses in Canada*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [9] Arndt U., Mauch W., Mühlbacher H., Tzscheutschler P., Geiger B. *Performance of Residential Cogeneration Systems in Germany*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [10] Sasso M., Roselli C., Sibilio S., Possidente R. *Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Italy*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [11] Di Pietra B. *Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in different Italian climatic zones*. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007
- [12] Dorer V., Weber A. *Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Switzerland*. IEA/ECBCS Annex 42 Report
- [13] Gähler C., Gwerder M., Lamon R., Tödtli J. *Optimal Control of Cogeneration Building Energy Systems*. 9th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2007, Helsinki, 2007
- [14] Siehe www.carbontrust.co.uk
- [15] EU Projekt **GenFC**, Koordination Forschungszentrum Jülich, D. Siehe www.genfc.org
- [16] EU Projekt **PolySMART**, Koordination Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, D. Siehe www.polysmart.org

Anhang

AM ANNEX 42 TEILNEHMENDE LÄNDER UND INSTITUTIONEN

Land	Institution / Firma
Belgium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ University of Liège / Department of Electrical Engineering and Computer Science ▪ COGEN Europe ▪ Catholic University of Leuven
Canada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Natural Resources Canada (NRCan) / CANMET Energy Technology Centre ▪ University of Victoria / Department of Mechanical Engineering ▪ National Research Council (NRC) / Institute for Research in Construction ▪ Hydro-Québec / Energy Technology Laboratory (LTE)
Finland	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technical Research Centre of Finland (VTT) / Building and Transport
Germany	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Research Institute for Energy Economy (FfE)
Italy	<ul style="list-style-type: none"> ▪ National Agency for New Technology, Energy and the Environment (ENEA) ▪ University of Sannio ▪ Second University of Napoli
Netherlands	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energy Research Centre Netherlands (ECN) / Renewable Energy in the Built Environment
Norway	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Norwegian Building Research Institute (NBRI) ▪ Telemark University College
United Kingdom	<ul style="list-style-type: none"> ▪ University of Strathclyde / Energy Systems Research Unit (ESRU) ▪ Cardiff University / Welsh School of Architecture (WSA)
United States of America	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Penn State University / Energy Institute (PSU) ▪ Texas A&M University / Department of Architecture (TAMU) ▪ National Institute of Standards and Technology (NIST) ▪ National Renewable Energy Laboratory (NREL) ▪ National Fuel Cell Research Center of the University of California-Irvine (NFCRC)
Schweiz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Empa) / Building Technologies Laboratory ▪ Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)/ Laboratory for Industrial Energy Systems ▪ Hexit AG (Hexis) ▪ Siemens Schweiz AG (Siemens)

ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Bedeutung
CCPC	Kombi-Kraftwerk (Combined cycle power plant)
CH	Schweiz
FC	Brennstoffzelle (Fuel Cell)
ICE	Verbrennungsmotor (Internal combustion engine)
HP	Wärmepumpe (Heat pump)
MFH	Mehrfamilienhaus
NRPE	Nicht-erneuerbare Primärenergie
PA	Leistungsbewertung (Performance Assessment)
PE	Primärenergie
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell (polymer membrane fuel cell)
PH	Passivhaus
SE	Stirling-Motor
SFH	Einfamilienhaus
SOFC	Solid oxide fuel cell
ST	Sub task
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung