



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

Zwischenbericht

Ausgearbeitet durch

Viktor Dorer, Empa
8600 Dübendorf, viktor.dorer@empa.ch

Projektteam:

Empa Building Technologies: V. Dorer, A. Weber
EPFL-LENI: Dr. F. Maréchal
Siemens Schweiz AG: Dr. J. Tödtli, Dr. C. Gähler, M. Gwerder
Hексis AG: R. Kober mit A. Schatz (Unterauftrag)

Impressum

Datum: 10. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm REN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, bereichsleiter@bfe.admin.ch

Projektnummer: 151 043

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	1
1. Ausgangslage.....	2
2. Ziel der Arbeit	2
4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	2
STA.....	2
ST B - Modelling	2
ST B – Experimental.....	4
ST C.....	5
5. Diskussion	5
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	6
Symbolverzeichnis	6
Referenzen.....	7

Zusammenfassung

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 sind nun alle Spezifikationen für die Modellierung der einzelnen Typen von Mikro-BHKW Geräten erstellt, und die Modelle in Gebäudesimulationsprogrammen wie *ESP-r* und *TRNSYS* und teilweise auch in *Matlab* implementiert und getestet. Die Modelle werden für eine Reihe von Geräten kalibriert und validiert. Dazu wurden an verschiedenen teilnehmenden Institutionen Labortests an Geräten durchgeführt. Der Schweizer Beitrag befasst sich vor allem mit den Modellen für SOFC und PEMFC und der Implementierung aller Modelle in *TRNSYS*. Zudem werden vertieft Regelungsaspekte und Optimierungsmethoden behandelt. Resultate aus Labor- und Feldmessungen von Hexis fliessen ebenfalls ein.

Im Subtask C sollen verschiedene Systeme bezüglich Energie, Emissionen und Kosten evaluiert werden und daraus Hinweise für geeignete Anwendungsgebiete und Konfigurationen von solchen Geräten abgeleitet werden. Dazu wurde eine umfassende Methodik erstellt. Mit den Arbeiten an den einzelnen nationalen Studien wurde begonnen.

Abstract

In Subtask A of the IEA project, demand profiles have been prepared for domestic hot water and for electricity of appliances, typical for Europe and North America, as 5 und 15 min interval values.

In Subtask B all model specifications for the different types of micro-cogeneration units are now available, and the respective models are implemented and tested in building simulation codes such as *ESP-r* and *TRNSYS*, and partially also *Matlab*. The models are now calibrated for a number of micro-cogeneration units and validated using data from a number of tests conducted by a number of project participating institutions. The Swiss contribution concentrates on the SOFC and PEMFC model development and the implementation of all models into *TRNSYS*. In addition, aspects of control and optimisation methods are treated. Results from laboratory and field measurements of Hexis contribute also to this task.

In Subtask C the performance of several systems is assessed in terms of energy, emissions and cost, in order to determine optimal applications and configurations of such systems. For this a comprehensive methodology has been established. Work on these individual national studies has started.

1. Ausgangslage

Im Gebäudebereich sinkt der Wärmebedarf (insbesondere der Heizwärmebedarf), der Strombedarf steigt jedoch weiterhin. Auf der Versorgungsseite sollen hochwertige, nicht erneuerbare Energieträger in Zukunft nicht ohne Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) genutzt werden. Je nach Art der Stromerzeugung kann es von Vorteil sein, den Restwärmebedarf in Niedrigenergiegebäuden durch Mikro-Blockheizkraftwerke (Mikro-BHKW) zu decken. Brennstoffzellengeräte für die Hausenergieversorgung stehen dabei im Vordergrund. Bei Einsatz von erneuerbaren gasförmigen Energieträgern (Gas aus Biomasse, Wasserstoff) stellen sie auch eine Möglichkeit der nachhaltigen Gebäudetechnik dar.

Brennstoffzellensysteme stehen dabei in einem kompetitiven Umfeld zu anderen Mikro-BHKW-Geräten, und zu den bestehenden, traditionellen Heizsystemen wie Brennwertkessel oder Wärmeppumpen. Sie stehen auch in Konkurrenz zu erneuerbaren Energiesystemen, insbesondere zu Solaranlagen (Solarkollektor- und Photovoltaik-Anlagen), sie können diese aber auch sinnvoll ergänzen.

2. Ziel der Arbeit

Das **generelle Ziel** des IEA Annex 42 ist es, Simulationsmodelle und –tools zu entwickeln und anhand von Messungen zu verifizieren, um damit sinnvolle Einsatzbereiche für Brennstoffzellengeräten und anderen Mikro-BHKW-Geräte für Wohngebäude und Gebäude mit ähnlicher Nutzung definieren zu können. Dadurch soll die Entwicklung von solchen Systemen vorantrieben werden können.

Im **Subtask A** (ST A) wird eine Technologieübersicht erstellt und es werden Bedarfsprofile für Strom und Brauchwarmwasser zusammengetragen. Im **Subtask B** (ST B) werden Modelle entwickelt, in bestehende Rechenprogramme implementiert, und anhand von gemessenen Leistungsdaten von Geräten und Systemen kalibriert und verifiziert (Subtask B-Modelling). Die entsprechenden Messungen sind nun dem Subtask B-Experimental zugeordnet. Im **Subtask C** (ST C) werden mittels dieser Modelle verschiedene Systemkonfigurationen simuliert und anhand einer generellen Methodologie evaluiert, und daraus Hinweise für den optimalen Einsatzbereich von solchen Geräten abgeleitet [1].

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

Ziele des Schweizer Projektes für das Jahr 2006 waren:

- ST A: Abschluss der Erstellung von Bedarfsprofilen.
- ST B: Fertigstellung der Spezifikation für das SOFC/PEMFC Modell, Implementierung dieses sowie der Modelle für SE und ICE in TRNSYS und teilweise Matlab, und Testen dieser Modelle. Zusammenfassung der Resultate aus den Hexas Feldtests.
- ST C: Fertigstellung einer Methodik für die durchzuführenden Systemevaluationen, Definition und Beginn der nationalen Simulationsstudie und der Multikriterien-Optimierung, sowie Entwicklung von optimierten Regelalgorithmen.

4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

STA

U.Cardiff erstellte auf der Basis des IEA SHC Annex 26 Generators Daten für Warmwasserbedarfsprofile für verschiedene Bedarfsniveaus in 5-min und 15-min Schritten und zeigte, 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 Anwendung des Tools für europäische Verhältnisse wird geprüft.

ST B - MODELLING

Das folgende generelle Vorgehen wird für die Entwicklung der Modelle angewendet: (a) Spezifikation, (b) Implementierung, (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 EPFL hat für die Entwicklung des PEMFC Modells zuerst ein zweiteiliges Vorgehen verfolgt: a) Detailliertes Modell basierend auf einem physikalisch-chemischen Prozessmodell, b) beschreibendes

Modell, basierend auf den mit Modellteil a) bestimmten Parameter. Dieses Vorgehen wurde aber aufgegeben, da festgestellt werden musste, dass die für das detaillierte Modell benötigten Daten und Flussdiagramme der vorgesehenen FC Geräte kaum im benötigten Umfang in Erfahrung gebracht werden können. EPFL, Empa und NRCan haben dann die Spezifikation der SOFC [2] so erweitert, dass nun eine generelle Spezifikation für FC entstand [3], siehe Figur1.

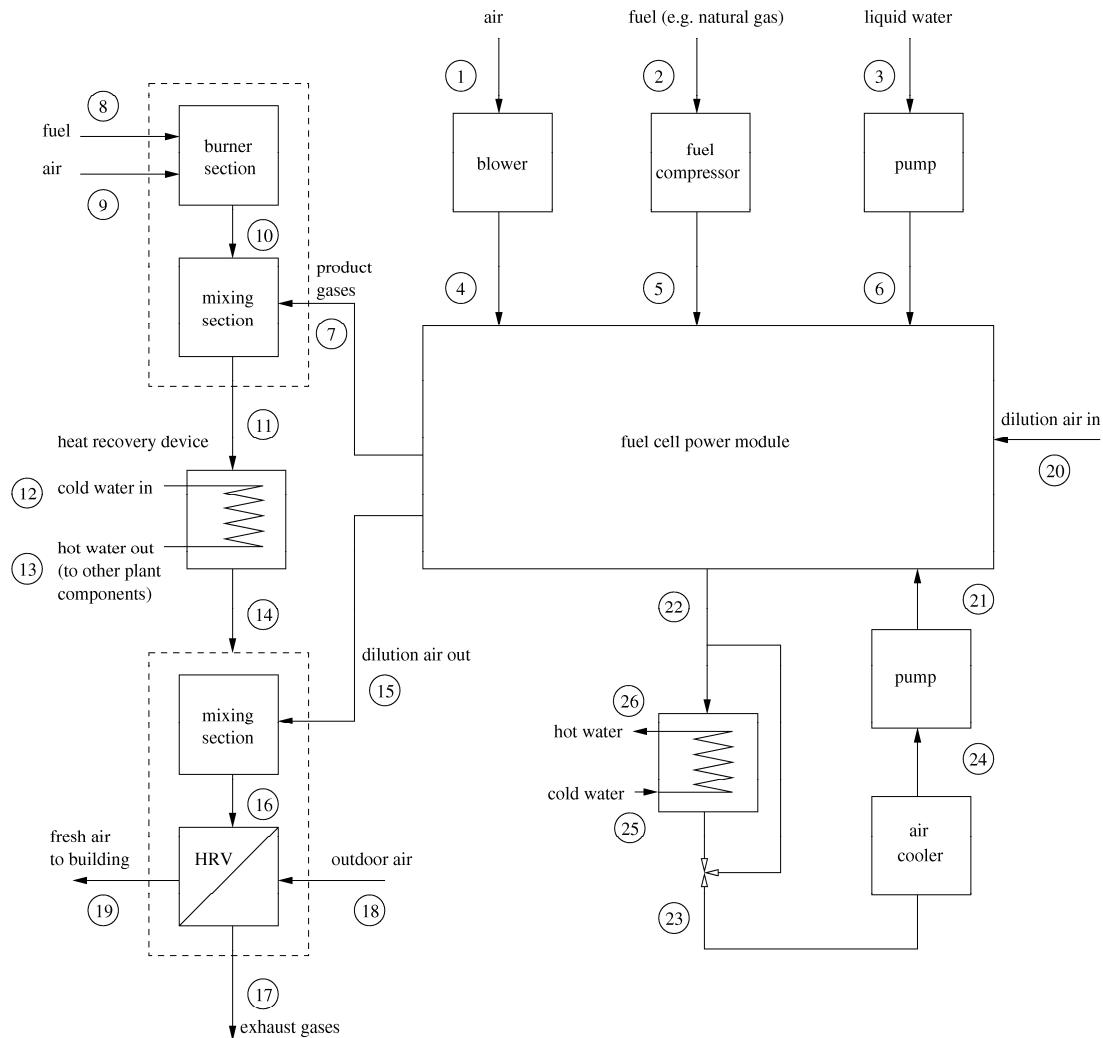


Fig. 1 Subkomponenten im Modell für SOFC und PEMFC Brennstoffzellen-Systeme [3]

Empa hat dieses SOFC/PEMFC Modell und auch die SE und ICE Modelle in *TRNSYS* implementiert und ausgiebig getestet, und teilweise auch kalibriert und validiert. Zusammen mit Siemens wurde auch weiteres Konw-how bezüglich der Kopplung von *Matlab* und *TRNSYS* gewonnen.

Platform	SOFC	PEMFC	SE/ICE	Availability
EES	○□			U
EnergyPlus	⊗☒		○	P
ESP-r	⊗☒	⊗	⊗☒	P
IDA ICE	⊗☒			P
MATLAB		*	*	?
TRNSYS	⊗☒	⊗, *	⊗☒	P

- A 42 model partly implemented
- ⊗ A 42 model fully implemented
- A 42 model partly tested (comparative tests)
- ☒ A 42 model fully tested (comparative tests)
- * Non-A 42 model implemented
- P Model(s) will be publicly available
- U Model(s) will be unavailable to the public
- ? Availability of model(s) unknown

Tab. 1 Liste der im IEA Annex 42 entwickelten Modelle

Tabelle 1 zeigt die entwickelten Modelle und ihren Status bezüglich Implementation und Verfügbarkeit, und Tabelle 2 zeigt den Status bezüglich der Kalibration der Modelle anhand von Messdaten.

Cogen Type	Produkt	Kalibriert	Test Data Set
SOFC	<i>FCT</i> <i>HEXIS</i>	✓ geplant	FCT, U.Liege HEXIS
PEMFC	<i>Plug Power</i> <i>Ida Tech</i> <i>Vaillant</i>	In Arbeit In Arbeit In Arbeit	NIST, NFCRC NIST FfE
SE	<i>WhisperGen</i> <i>SOLO</i>	✓ geplant	U.Leuven, NRCan, NRC FfE
ICE	<i>Senertec</i> <i>Ecopower</i>	✓ offen	U. Leuven, FfE, Empa FfE

Tab. 2 Liste der im IEA Annex 42 für spezifische Geräte/Produkte kalibrierten Modelle

Das Verfahren einer Kalibration ist u.a. in [4] dokumentiert. Durch die Schwierigkeiten der Aufbereitung und –veröffentlichung der Messdaten wurden die Kalibrationsarbeiten z.T. verzögert.

ST B – EXPERIMENTAL

Institution / Land	Gerätetyp / Hersteller siehe Abkürzungen	Mess-Umgebung / Status
FfE, Deutschland	ICE / <i>PowerPlus</i> ICE / <i>SenerTec</i> SE / <i>SOLO</i> PEMFC / <i>Vaillant</i>	Stationäre und dynamische Messungen nach Bedarfsprofilen, im Labor: Messungen abgeschlossen, Bericht in Bearbeitung. Messungen abgeschlossen, Bericht in Bearbeitung Messungen im Gange Messungen abgeschlossen, Bericht in Bearbeitung
ENEL, Italien	PEMFC / <i>HPower</i> SE / <i>SOLO</i> MGT / <i>Capstone</i> ICE / <i>Aisin</i>	Tests abgeschlossen, Gerät defekt Testgebäude, Labor, Messungen abgeschlossen Testgebäude, Labor, , Messungen abgeschlossen Messungen im Gange
U.Sannio, Italien	ICE / <i>Aisin</i>	Tests abgeschlossen, Messdaten nur beschränkt brauchbar
NRC/CCHT/NRCan, Kanada	SOFC / <i>FCT</i> SE / <i>WhisperGen</i>	Messgebäude mit simulierter Nutzung: Messungen abgeschlossen Detailierte Messungen abgeschlossen
NFCRC, USA	PEMFC / <i>Plug Power</i>	Hochaufgelöste Labormessungen abgeschlossen
NIST, USA	PEMFC, <i>Plug Power</i> PEMFC, <i>IdaTech</i> SOFC, <i>Acumetrics</i>	Labormessungen abgeschlossen, weitere nach Bedarf Labormessungen abgeschlossen, weitere nach Bedarf Lieferung Gerät Juli 2007
NREL, USA	PEMFC / <i>Plug Power</i>	Labor, Messungen angeschlossen
PSU, USA	SOFC / <i>FCT</i>	Labor-Messungen ab Nov 2006
U.Leuven, Belgien	ICE / <i>Senertec</i> SE / <i>WispherGen</i>	Messungen abgeschlossen Messungen abgeschlossen
U.Liège, Belgien	SOFC / <i>FCT</i>	EFH, bewohnt. Erste Messperiode abgeschlossen, weitere Messungen werden kaum durchgeführt
Hexis, Schweiz	SOFC / <i>Hexis</i>	Labor- und Feldmessungen
Empa, Schweiz	ICE / <i>Senertec</i>	Statische und dynamische Messungen 2000

Tab. 3 Liste der im IEA Annex 42 und durchgeföhrten Messungen sowie weiterer für die Modellierung benutzter Datensätze

In Tabelle 3 sind alle im Rahmen des Annex 42 durchgeführten Messungen sowie weitere für die Modellierung benutzte Datensätze aufgeführt.

Es muss festgehalten werden, dass für einige Datensätze die Art der Zugänglichkeit noch nicht definitiv festgelegt ist, dies gilt vor allem für die Messungen bei FfE. Zugesichert ist, dass die Daten für die Kalibrierung und Validierung verwendet werden können, aber es ist teilweise noch Gegenstand von Verhandlung, in welcher Form die Messdaten selber verfügbar sein oder veröffentlicht werden.

ST C

Im STC wurde der laufend erweiterte Entwurf des State-of-the-art Reports über bestehenden Evaluationen und Feldtests ergänzt und zur Form einer Annotated Bibliography ergänzt (Empa) [5].

Die Methodik für die geplanten nationalen „Performance assessment“ Studien und Evaluationen wurde überarbeitet (Empa) [6].

Leider haben sich weitere Teilnehmer aus dem STC zurückgezogen. Es sind somit nur noch vier nationale Studien in Arbeit, nämlich diejenigen von NRCan, ENEA, FfE und Empa. Arbeiten weiterer Teilnehmer werden in wissenschaftlichen Artikeln, aber nicht als Annex 42 Report veröffentlicht werden.

Im verstärkten Masse kritisch für alle ST C Studien ist natürlich, dass die Modelle zeitgerecht implementiert und validiert zur Verfügung stehen werden!

FfE erstellte ein Excel basiertes Tool für die Beurteilung von Mikro-BHKW Anlagen auf der Basis der Norm VDI 2067.

Bei Siemens wurden Regelungsstrategien für eine Stirling Mikro-BHKW Anlage im Rahmen einer ETH Arbeit untersucht [7]. Darauf aufbauend untersuchte Siemens diese Stirling Mikro-BHKW Anlage mit Zusatzbrenner für drei Gebäudetypen. Eine kostenoptimierte und eine bezüglich Bedarf Primärenergie (PE) optimierte Regelung wurden untersucht [8]. Für die PE-optimierte Regelung wurde eine Kredit-Methode verwendet, bei der für ins Netz zurück gelieferte Elektrizität eine PE-Vergütung entsprechend dem eingesparten Netzstrom unter Berücksichtigung des Strom-Mix verrechnet wird. Für die Optimierung musste das Systemmodell linearisiert werden. Die Simulation wurde im Sinne eines „performance bound“ mit einer idealen Regelung, mit „moving horizon“ unter Kenntnis zukünftiger Werte, durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass für Zürcher Verhältnisse im Vergleich zu einem konventionellen System mit kondensierender Terme und Netzstrom Einsparungen für die Betriebskosten von 20 bis 30 %, und für den Primärenergiebedarf von 20 bis 25% resultieren, und dass die Unterschiede zwischen den beiden Regelstrategien nicht gross sind. Die gewählten Tarif-Strukturen sind somit schon recht nahe am Optimum bezüglich Primärenergiebedarf. Des Weiteren wurden die Einflüsse verschiedener Parameter untersucht, u.a. Speichergrösse, Nachabsenkung, Tarif-Strukturen (Gas und Elektrizität), Wirkungsgrad SE-Anlage, und Strom-Mix des Netzes.

Das Thema der optimalen Regelung wurde auch im Rahmen einer von EPFL und Siemens betreuten Diplomarbeit an der EPFL behandelt [9].

EPFL hat zudem begonnen, für ausgewählte Fälle MOO (Multi-objective optimization) - Studien durchzuführen. Die Resultate sind noch nicht dokumentiert. Das Verfahren wurde jedoch schon für Anlagen in Bürogebäuden angewendet [10].

5. Diskussion

Erreichung Ziele 2006 Projekt CH: Der Stand der Arbeiten in ST B ist in etwa 3-6 Monate hinter dem ursprünglich geplanten Fortschrittsgrad, er ist aber kohärent mit der Planung innerhalb des IEA Annex. Damit sind auch gewisse Arbeiten für ST C weiter verzögert. Kritisch ist auch, dass nur wenige Teilnehmer auf der Basis *TRNSYS* und *Matlab* arbeiten. Der Mehraufwand der Schweizer Teilnehmer, um entsprechende Modelle auch für *TRNSYS* und teilweise *Matlab* bereitzustellen, konnte durch Kapselfung der in *ESP-r* implementierten Modelle und die Einbindung in *TRNSYS* mit entsprechendem Interface reduziert werden, aber der Aufwand für die Modellierung war bisher doch deutlich höher als geplant.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus dem Annex 42 resultieren Bedarfsprofile und Modelle von Mikro-BHKW Geräten für Gebäudesimulationsprogramme. Mithilfe Messungen an den Geräten werden die Modelle kalibriert und validiert. In nationalen Studien werden mithilfe dieser Modelle dann verschiedene Anlagenkonfigurationen analysiert und daraus Hinweise für geeignete Anwendungsgebiete und Konfigurationen für Mikro-BHKW Anlagen abgeleitet. Im Schweizer Projekt werden zudem vertieft Regelungsaspekte und Optimierungsmethoden behandelt.

Ziele 2007: In ST B muss die Validierung der Modelle rasch abgeschlossen werden. Dann werden die einzelnen Berichte zu „Specifications“, „Comparative Testing“, und „Calibration and Empirical Validation“ erstellt. In ST C sollen die rechnerischen Systemuntersuchungen bis Juni 2007 durchgeführt werden können, und dann auch dokumentiert werden. Zudem wird eine Zusammenfassung der Feldversuche von Hexit fertig gestellt.

Abschluss des IEA Annex 42: Das letzte Arbeitsmeeting ist im Oktober 2007 geplant. Als Abschluss des Projektes ist eine Konferenz im März 2008 in Ottawa geplant.

Symbolverzeichnis

Abkürzung	Institution/Firma	Land
U.Liège	University of Liège	Belgien
U.Leuven	University of Leuven (observer)	
FfE	Research Institute for Energy Economy	Deutschland
U.Sannio	Università degli studi del Sannio	Italien
ENEA	National Agency for New Technology, Energy and the Environment	
NRCan	Natural Resources Canada	Kanada
NRC / CCHT	National Research Council / Canadian Centre for Housing Technology	
U.Cardiff	Cardiff University	UK
PSU	Penn State University	USA
NFCRC	National Fuel Cell Research Center, University of California-Irvine	
NIST	National Institute of Standards and Technology	
NREL	National Renewable Energy Laboratory	
Empa	Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research	Schweiz
EPFL	Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne	
Hexit	Hexit Ltd.	
Siemens	Siemens Schweiz AG, Building Technologies Group	
Abkürzung	Bedeutung	
CH	Schweiz	
FC	Fuel Cell	
FCT	Fuel Cell Technologies Ltd.	
ICE	Internal combustion engine	
PE	Primärenergie	
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell (polymer membrane fuel cell)	
SE	Stirling engine	
SOFC	Solid oxide fuel cell	
ST	Sub task	

Referenzen

- [1] IEA Annex 42 FC+COGEN-SIM. Beschreibungen und Dokumente des IEA Annex 42 sind einsehbar auf der home page des Annex: <http://www.cogen-sim.net/>
- [2] I. Beausoleil-Morrison, A. Schatz, F. Maréchal. *A Model for Simulating the Thermal and Electrical Production of Small-Scale Solid-Oxide Fuel Cell Cogeneration Systems within Building Simulation Programs*. HVAC&R Research, Vol. 12, No. 3a, 2006.
- [3] I. Beausoleil-Morrison, A. Weber, F. Maréchal, B. Griffith. *Model Specifications for a Fuel Cell Cogeneration Device* IEA Annex 42 STB Working Document. 2006
- [4] I. Beausoleil-Morrison, K. Siemens, S. Oikawa. *On Methods for Calibrating the Heat Exchanger of a Model for Simulating the Thermal and Electrical Production of Small-Scale Solid-Oxide Fuel Cell Cogeneration Systems*. 7th International Conference on System Simulation in Buildings, Lie`ge, December 11-13, 2006
- [5] V. Dorer . *Review on Existing Residential Cogeneration Systems Evaluations*. IEA Annex 42 STC Draft Working Report. 2006
- [6] V. Dorer, A. Weber. *Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems: Methodology: Purpose, methods, criteria, and parameters*. IEA Annex 42 STC Working Report 2-V8. 2006
- [7] N. Laubacher: *Regelungsstrategien für ein Stirling-Mikro-Blockheizkraftwerk*. Master's thesis, ETH Zürich, Switzerland, carried out at Siemens Switzerland Ltd. / Building Technologies Group, 2006
- [8] R. Lamon, C. Gähler, and M. Gwerder: *Optimal Control of CHP Building Energy Systems*. Siemens Switzerland Ltd / Building Technologies Group. 2006
- [9] A. Collazos: *Optimisation Based Control System for the Optimal Management of Micro-Cogeneration Systems*. Master's thesis, EPF Lausanne, Switzerland, 2006
- [10] C. Weber, F. Marechal, D. Favrat, S. Kraines. *Optimization of an SOFC-based decentralized polygeneration system for providing energy services in an office-building in Tokyo*. Applied Thermal Engineering 26 (2006) 1409–1419