



# GEBAUDEINTEGRIERTE POLYVALENTE ENERGIEBEREITSTELLUNG

## GEBAUDE ALS KRAFTWERK

### Jahresbericht 2010

Autor und Koautoren	Christian Gaegauf, Viktor Dorer, Andreas Weber, Frank Tillenkamp, Gerhard Zweifel, Christian Struck, Tobias Keller, Sven Moosberger
beauftragte Institution	Ökozentrum Langenbruck
Adresse	Schwengiweg 12, 4438 Langenbruck
Telefon, E-mail, Internetadresse	062 387 31 26, <a href="mailto:christian.gaegauf@oekozentrum.ch">christian.gaegauf@oekozentrum.ch</a> , <a href="http://www.oekozentrum.ch">www.oekozentrum.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	103 333 / 154 395
BFE-Projektleiter	Dr. Charles Filleux
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Oktober 2009 - 31. Dezember 2011
Datum	14. Dezember 2010

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt *Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung* (MicroPolygen) zeigt neuartige Konzepte einer nachhaltigen, gebäudeintegrierten, polyvalenten Energieversorgung auf. Durch die Untersuchung der Versorgung von Elektro- resp. Plug-in-Hybridautos mit Eigenstromanlagen adressiert das Projekt die durch das Gebäude induzierte Mobilität. Mit dem Einbezug von Batterien und Range-Extendern von Elektroautos in das System Gebäude ergeben sich neue Konzepte für die Energiespeicherung und Kraft-Wärmekopplungsanlagen (KWK). Das Gebäude soll sich mit einer intelligenten Erzeugung dem Verbrauchsprofil anpassen und sich so optimal in den Kontext eines virtuellen Kraftwerkes einfügen.

Im Berichtsjahr lag der Hauptakzent auf der Bereitstellung der Anlagedaten von Mikro-Kraft-Wärmekopplungssystemen und der Schaffung von Systemmodellen, mit denen sich Technologievarianten simulieren und damit vergleichen lassen. Die im Projekt IEA ECBCS Annex 42 entwickelten Modelle für KWK-Geräte kleiner Leistung wurden auf die verwendete Simulationsumgebung IDA ICE angepasst. Mit diesen Grundlagen lassen sich Energie- und Umwelteffizienz optimierter, gebäudeintegrierter Energieversorgungskonzepte mit Referenzsystemen vergleichen. Die gewählten Referenzsysteme umfassen Wärmepumpen bzw. fossil befeuerte Kesselsysteme für die Wärmebereitstellung, Strom ab Netz sowie Autos, die mit fossilen Treibstoffen fahren. Der Energiebedarf wird nach drei unterschiedlichen Charakteristiken von Gebäuden differenziert: 1) Schweizer Durchschnittsgebäude, 2) Gebäude gemäss den Mustervorschriften der Kantone (MuKEN) und 3) Gebäude, welche die Minerale-P Vorgaben erfüllen.

Mögliche Synergiepotentiale von Elektrofahrzeug und häuslicher Stromerzeugung wurden identifiziert und relevante Systeme von polyvalenter Energiebereitstellung für Gebäude und Mobilität definiert.

## Projektziele

Das Projekt *Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung* (MicroPolygen), das von Partnern des Kompetenznetzwerkes Gebäudetechnik und Erneuerbare Energien (brenet) bearbeitet wird, strebt die Entwicklung von neuartigen Konzepten für eine nachhaltige, gebäudeintegrierte, polyvalente Energieversorgung an. Der Hauptakzent des Projekts liegt auf der Systemuntersuchung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen (KWK), die eine intelligente Wärme- und Stromversorgung von Wohneinheiten angepasst an ihr Bedarfsprofil gewährleisten. Die Gebäudeinfrastruktur wird damit als Teil eines virtuell gedachten Kraftwerkes genutzt. Neben dem Energiebedarf für Wärme und Strom im Haushalt wird der Aspekt der Mobilität in die Energiebetrachtungen mit einbezogen. Dies aus der Überlegung heraus, dass ein Gebäude wegen dem Mobilitätsbedarf seiner Bewohner zusätzlichen Individualverkehr auslöst (standortinduzierte Mobilität).

Im Berichtsjahr lag der Hauptakzent auf der Bereitstellung der Anlagedaten von Mikro-Kraft-Wärme-kopplungssystemen und der Schaffung von Systemmodellen, mit denen sich die Technologievarianten simulieren und vergleichen lassen. Mögliche Synergiepotentiale von Elektrofahrzeug und häuslicher Stromerzeugung wurden identifiziert und relevante Systeme von polyvalenter Energiebereitstellung für Gebäude und Mobilität definiert.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### ERWEITERTE MODELLBILDUNG FÜR KRAFT-WÄRMEKOPPLUNGSANLAGEN

Die Bewertung der Energie- und Umweltaspekte von polyvalenten Energiesystemen in Gebäuden erfolgt mittels dynamisch-thermischer Gebäude- und Anlagensimulation. Diese kann mit verschiedenen Simulationstools wie esp-r, TRNSYS oder IDA ICE erbracht werden. Für das vorliegende Projekt wird das IDA ICE-Tool angewendet. IDA ist ein gleichungsbasiertes Simulationswerkzeug, das modular, hierarchisch strukturiert und durch Nutzung des Neutral Modelling Formats universal anwendbar ist [1]. Während Simulationsmodelle für Speicher, Photovoltaikpanele und Wärmepumpen schon ausgiebig in der Literatur beschrieben und angewendet werden, sind KWK-Anlagen ein noch wenig bearbeitetes Thema.

Die Modellierung von KWK-Anlagen wurde im Rahmen des IEA Annex 42 [2] ausgearbeitet. Als Resultat wurden zwei KWK-Modelle erstellt und, soweit die Datengrundlage dies zulässt, kalibriert. Mit dem einen Modell lassen sich Solid-oxide- und Polymer-electrolyte-Brennstoffzellen abbilden, mit dem andern lassen sich Verbrennungsmotoren darstellen. Diese Ansätze wurden für die Implementierung des KWK-Tools in der IDA ICE-Umgebung mit berücksichtigt. Für den Modellierungsansatz und Umsetzung des Modells für IDA ICE wurde ein mittlerer Detaillierungsgrad für die dynamische Simulation der KWK-Anlagen festgelegt.

### GEBAUDE- UND ANLAGESYSTEME

Gemeinsam mit Elektrofahrzeugexperten wurde in einem Workshop das Synergiepotential von Elektrofahrzeug und häuslicher Stromversorgung/Stromerzeugung analysiert. Aufgrund des Workshops wurden die relevanten Konzepte der polyvalenten Energiebereitstellung für Gebäude und Fahrzeug ausgearbeitet. Diese Konzepte bilden die Basis für die Evaluation der Energie- und Umwelteffizienz der verschiedenen polyvalenten Energiesysteme.

Für die zu untersuchenden Gebäude- und Anlagensysteme wurden realistische Szenarien definiert. Die Betrachtung der Systemeffizienz von polyvalenten Energieanlagen bezieht sich auf eine Wohneinheit. Mit dem Bezug auf eine Wohneinheit lassen sich Zielgrößen wie Primärenergiebedarf oder Kohlendioxidemissionen auf Wohnbauten verschiedener Grösse als Ein- oder Mehrfamilienhäuser skalieren.

Die innovativen polyvalenten Energieanlagensysteme werden bezüglich Primärenergiebedarf und Klimagasemissionen mit Referenzsystemen verglichen (siehe Tabelle 1).

Systemszenarien	Systemkomponenten
Referenzszenario konservativ	Gaskessel für Raumwärme und Brauchwarmwasser, Auto mit fossilen Treibstoffen, Netzstrom
Referenzszenario progressiv	erdgekoppelte Wärmepumpe für Raumwärme und Brauchwarmwasser, Elektrofahrzeug, Netzstrom
Szenario Polyvalente Energiesysteme	KWK-Anlage für Strom und Raumwärme, Photovoltaik-Anlage, Wärmepumpe nur für Brauchwarmwasser, Elektroauto, Netzverbund

**Tabelle 1** *Übersicht der gewählten Systemszenarien*

Die Energieversorgung soll den jährlichen Bedarf für Raumwärme, Brauchwarmwasser, Haushaltstrom für Licht und Geräte sowie die Fahrleistung von 15'000 km eines Fahrzeugs abdecken. Für die Energie- und Umweltbilanzen wird der Strom ab Netz nach dem Schweizer Strommix, dem europäischen Strommix (ENTSO-E, früher UCTE) und dem Strom aus einem Gas-/Dampf-Kraftwerk variiert.

Um den Gegebenheiten des Schweizer Gebäudeparks gerecht zu werden, wurden drei typische Gebäudearten für die Berechnungen ausgewählt. Durch die Wahl der drei Gebäudeenergieprofile 1) Durchschnittsgebäude (Baujahr 1925-1965), 2) Gebäude gemäss Mustervorschriften der Kantone (MuKEN) [3] und 3) Gebäude nach Minergie-P Vorgaben [4] wird sichergestellt, dass die Projektergebnisse auch repräsentativ sind.

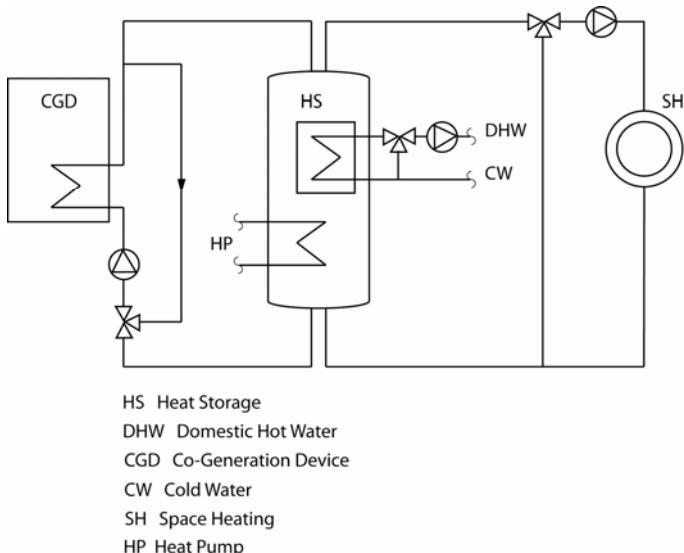
Aus den Systemszenarien und den energetischen Gebäudestandards ergibt sich die in Tabelle 2 aufgeführten Variantenmatrix. Die einzelnen Varianten werden zusätzlich um die verschiedenen KWK-Typen erweitert.

Systemszenarien	Durchschnittsgebäude	MUKEN	MINERGIE-P
Referenzszenario konservativ	x	x	-
Referenzszenario progressiv	x	x	x
Szenario Polyvalente Energiesysteme	x	x	x

**Tabelle 2** *Variantenmatrix der zu simulierenden Systemszenarien*

Für die drei energetischen Gebäudestandards wurde mittels Literaturrecherche die Materialisierung festgelegt. Das Modell der repräsentativen Wohneinheit basiert auf dem Minergie-P Musterhaus. Dieses wurde in der Simulationsumgebung dargestellt und geprüft.

Die Betrachtung polyvalenter Energiesysteme erfordert die Integration der Energiegewinnungs- und Verbrauchssysteme auf hydraulischer und elektrischer Ebene. Für das Szenario *Polyvalente Energiesysteme* wurde das hydraulische Konzept wie in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt schematisch entwickelt.



**Abbildung 1** *Hydraulische Einbindung der Mikro-KWK-Anlage in die Haustechnik*

## EMISSIONS- UND LEISTUNGSDATEN VON KRAFT-WÄRMEKOPPLUNGSANLAGEN

Eine Pellet-KWK-Anlage [5] wurde in verschiedenen Voll- und Teillastbetriebszuständen getestet. Die werkseitigen Leistungsangaben konnten auf der Anlage im Felde erreicht werden. Die Messungen der Energiebilanz wurden über einen Zeitraum von 10-15 Stunden durchgeführt. Die Emissionen der Anlage wurden in den drei verschiedenen Betriebsphasen Kaltstart, Warmstart und Dauerbetrieb ermittelt. Die Emissionen im Kaltstart wurden in der Startphase der Feuerung, der Warmstart in der Startphase der Feuerung nach 1 Stunde Betriebspause und der Dauerbetrieb 6 Stunden nach dem Start der Feuerung gemessen.

Mittels Recherche wurden verfügbare Emissions- und Leistungsdaten von Mikrogasturbinen (MGT) aufgearbeitet. Anhand dieser Datengrundlage wurde ein physikalisches Modell erstellt, evaluiert und auf einen kleineren Leistungsbereich skaliert. Dieses theoretische Modell orientiert sich am Stand der Technik und stellt ein Mass für zukünftige Entwicklungen in der dezentralen Energieversorgung auf der Basis von MGT dar. Zurzeit sind Anpassungen am Modell, u.a. für die Implementierung in die Simulationsumgebung IDA ICE, im Gange.

Es wurde eine Marktrecherche von Verbrennungsmotoraggregaten durchgeführt, die sich als Diesel- oder Benzin-getriebene Range Extender für Elektrofahrzeuge eignen.

## Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt *Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung* ist ein Teilprojekt im brenet-Themenbereich *Kraftwerk Haus*. Es erfolgt ein regelmässiger Austausch mit der Projektleitung des BFE-Projektes *Kraftwerk Haus im ländlichen Raum*.

Die MicroPolygen-Projektleitung ist in der Begleitgruppe des Projektes *Near Zero Energy Buildings* vertreten, das vom Institut Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitet wird. Ebenfalls nimmt die Projektleitung in den Arbeitsgruppensitzungen zum Thema Plusenergiehäuser des energie-cluster Schweiz teil.

Die Ergebnisse des Projektes werden der brenet-Themengruppe *Kraftwerk Haus* kommuniziert, wo sie im Rahmen von Fachtreffen vertieft werden. Anlässlich des brenet-Status-Seminars an der ETH Zürich wurde das Projekt einem breiteren Fachpublikum vorgestellt [6].

## Internationale Zusammenarbeit

Aus den Kontakten im Rahmen des EU Projektes PolySMART [7] wurden Arbeiten über die Modellierung und Evaluation von SOFC Systemen weitergeführt und veröffentlicht [8-10]. Sie sind auch für dieses Projekt von Interesse. Ebenso werden die Arbeiten im Rahmen des IEA ECBCS Annex 54 [11] verfolgt, soweit möglich und relevant für das vorliegende Projekt.

Der fachliche Austausch auf internationaler Ebene erfolgt im Rahmen von Konferenzbeiträgen. Für die internationale Konferenz Microgen 2011 in Glasgow (UK) ist ein Abstract mit dem Titel *Uncertainty and parameter sensitivity of a simplified simulation model for predicting the performance of co-generation units in domestic buildings* [12] eingereicht worden. Im geplanten Paper soll über die Simulationsergebnisse berichtet werden.

## Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Die Arbeitsschritte *Erweiterte Modellbildung KWK* (AS1), *KWK-Emissions- und Leistungsdaten* (AS2) sowie die *Systemkonzepte* (AS3) konnten gemäss Zeitplan durchgeführt werden. Die Einbindung der Mobilität ins Kraftwerk Haus wurde über Expertenworkshops geklärt und in die Systemszenarien integriert. Die *KWK-Konzepte für die Nutzung von Range Extendern für die gebäudeeigene Energieversorgung* (AS4) kann in Abänderung des ursprünglichen Zeitplanes erst anfangs 2011 angegangen werden. Die verzögerte Bearbeitung dieses Arbeitsschrittes hat jedoch keinen Einfluss auf die anderen Projektarbeiten. Zum Arbeitsschritt AS4 wird im ersten Halbjahr 2011 an der HSLU unterstützend eine Diplomarbeit durchgeführt.

Die Simulationen der Systemvarianten mit dem vereinfachten KWK-Modell in IDA ICE sind angelau-fen, werden aber im kommenden Jahr noch intensiv bearbeitet werden müssen. Dazu gehört die Fest-legung der Verbrauchsprofile für Heizung, Brauchwarmwasser und Elektrizität der Wohneinheiten. Die Implementierung des Mikrogasturbinen-Modells in IDA ICE und Anpassungen im Bereich Abgasnut-zung mit Kondensation innerhalb des Arbeitsschrittes AS5 *Simulation von polyvalenten Energiesys-temen* liegen im Zeitplan. Eine ergänzende Arbeit zur Ausdehnung der Betrachtung polyvalenter Energiebereitstellung auf Quartierebene wird 2011 im Rahmen einer Projektarbeit innerhalb des HSLU-Masterstudiums durchgeführt.

Der Industriepartner mindset AG kämpfte im Berichtsjahr mit finanziellen Schwierigkeiten. Ende Jahr scheint sich jedoch eine Weiterführung des Baus eines Elektroautos mit Range Extender abzuzeichnen. Der von mindset AG verwendete Range Extender stammt von der Schweizer Firma Swissauto in Burgdorf. Swissauto arbeitet an der Entwicklung ihres Verbrennungsmotors für die Anwendung in Range Extendern weiter, so dass der Zugang zu den Leistungsdaten der Maschine gewährleistet bleibt.

Der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) lanciert unter dem Themenbereich *Die stromerzeugende Gasheizung* eine Kampagne zur Verbreitung von stationären Mikro-KWK-Anlagen. In einem Gebrauchstest werden verschiedene KWK-Produkte im SVGW-Labor getestet. Durch die SVGW-Kampagne können Mikro-KWK-Leistungsdaten der Hersteller erhärtet werden. Die MicroPolygen-Projektleitung hat mit dem SVGW Kontakt aufgenommen, um die Synergien zwischen den beiden Vorhaben zu identifizieren. Der SVGW ist interessiert Planungstools zu erhalten, welche die richtige Auslegung dieser neuartigen Gasheizung/Stromerzeugertechnologie ermöglichen. Es ist denkbar, dass die Ergebnisse der Anlagesimulation im vorliegenden Projekt dazu einen Beitrag liefern könnten.

## Referenzen

- [1] M. Trcka, *Co-simulation for performance prediction of innovative integrated mechanical energy systems in buildings* in Unit Building Physics and Systems at the Faculty of Architecture, Building and Planning, vol. Ph.D. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2008, pp. 163.
- [2] I. Beausoleil-Morrison, A. Ferguson, B. Griffith, N. Kelly, F. Maréchal, and A. Weber, *Specifications for Modelling Fuel Cell and Combustion-Based Residential Cogeneration Devices within Whole-Building Simulation Programs*, International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 42, October 2007.
- [3] [www.endk.ch/muken](http://www.endk.ch/muken), 2010-06-06
- [4] M. Ragonesi, U. P. Menti, A. Tschui, and O. Humm, Minergie-P, *Das Passivhaus nach Schweizer Art*, 1 ed: Faktor Verlag, 2008.
- [5] [www.sunmachine.de](http://www.sunmachine.de), 2010-06-06
- [6] Christian Gaegau, Viktor Dorer, Andreas Weber, Frank Tillenkamp, Gerhard Zweifel, Christian Struck, Tobias Keller, Sven Moosberger, *Gebäude als Teil des virtuellen Kraftwerkes*, 16. Status-Seminar Forschen und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt, ETH- Zürich, 2010
- [7] EU Projekt PolySMART. [www.polywsmart.org](http://www.polywsmart.org)
- [8] Kazempoor P., Ommi F., Dorer V. *Response of a Planar Solid Oxide Fuel Cell to Step Load and Inlet Flow Temperature Changes*. Journal of Power Sources (submitted 2010-11-18)
- [9] Kazempoor P., Dorer V., Weber A., *Modelling and Evaluation of Building Integrated SOFC Systems*, Int. Journal of Hydrogen Energy (2010) doi:10.1016/j.ijhydene.2010.11.003
- [10] Kazempoor P., Dorer V., Ommi F., *Modelling and Performance Evaluation of Solid Oxide Fuel Cell for Building Integrated Co- and Polygeneration*. Accepted for publication in Fuel Cells (accepted May 18, 2010). DOI: 10.1002/fuce.200900082
- [11] IEA ECBCS Annex 54 Integration of Micro-Generation and Related Energy Technologies in Buildings. [www.iea-annex54.org/](http://www.iea-annex54.org/)
- [12] Struck C et al., *Uncertainty and parameter sensitivity of a simplified simulation model for predicting the performance of co-generation units in domestic buildings*, abstract submitted to the 2nd International Conference on Microgeneration and Related Technologies (MICRoGEN'II), Glasgow (UK)