



SCHLUSSBERICHT VORPROJEKT Februar 2004



# Nachhaltige Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen und erneuerbaren Energien

Projektleiter:  
Viktor Dorer  
Robert Weber  
EMPA Dübendorf  
Abteilung Energiesysteme/Haustechnik  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf





# novatlantis – Ideen, Projekte, Forschung für die nachhaltige Stadtentwicklung.

novatlantis setzt die neusten Erkenntnisse und Resultate aus der Forschung im ETH-Bereich für eine nachhaltige Entwicklung von Ballungsräumen um. Wir zeigen an praktischen Beispielen, wie eine nachhaltige Zukunft aussehen kann. Gemeinsam mit Forschern und Wissenschaftlern des ETH-Bereichs initiieren wir transdisziplinäre Projekte. In Zusammenarbeit mit Behörden und Unternehmen werden Projekte realisiert, die gesellschaftliche und technische Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigen. Zukunftsweisend, wirtschaftlich und umweltfreundlich. Unser Ziel ist eine lebenswerte Zukunft für kommende Generationen. Hoher Lebensstandard und Komfort dank neuester Technik. Materielle und geistige Entwicklung dank wirtschaftlichem Wohlstand für alle. Eine intakte Umwelt dank schonender Verwendung der Ressourcen und geschlossenen Stoffkreisläufen. Wir orientieren uns an langfristigen Visionen. Das Jahr 2050 ist unser Zeithorizont.

---

## **Lenkungsausschuss**

Ulrich Bundi (Vorsitz)	EAWAG
Prof. Dr. Louis Schlapbach	EMPA
Prof. Dr. Ralph Eichler	PSI
NN	WSL
Roland Stulz	novatlantis

---

## **Programmleitung**

Roland Stulz (Vorsitz)	novatlantis
Prof. Dr. Markus Boller	EAWAG
Dr. Peter Hofer	EMPA
Dr. Kurt Baltensperger	ETH-Rat
Prof. Dr. Alexander Wokaun	PSI
Dr. Werner Spillmann	WSL

---

## **Geschäftsleitung novatlantis**

Roland Stulz  
Christoph Hartmann  
Tanja Lütolf  
Mario Bleisch

---

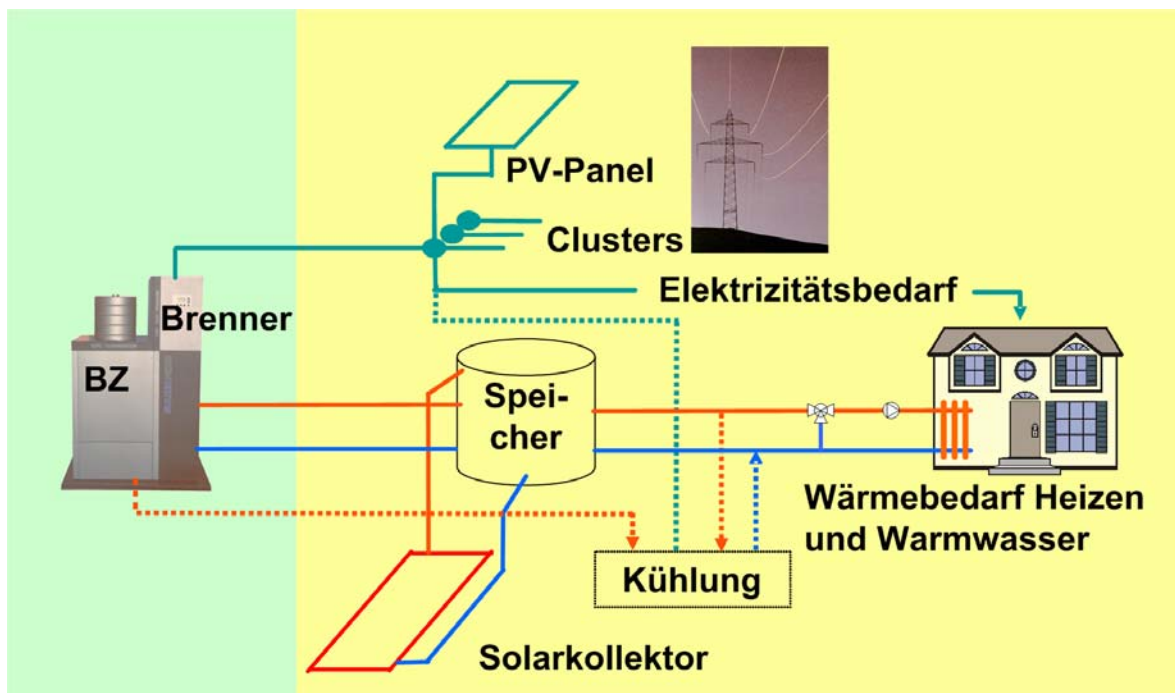
## **Kontakt**

Telefon ++41 (0)1 305 93 60  
E-Mail [info@novatlantis.ch](mailto:info@novatlantis.ch)

---

# Nachhaltige Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen und erneuerbaren Energien

Schlussbericht Vorprojekt  
Februar 2004



Viktor Dorer  
Robert Weber

EMPA Dübendorf  
Abteilung Energiesysteme/Haustechnik

© EMPA Dübendorf, Februar 2004

---

EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt  
Abt. Energiesysteme / Haustechnik  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf

Fon +41 (0)1 823 55 11 Fax +41 (0)1 821 62 44 [www.empa.ch](http://www.empa.ch)

# Zusammenfassung

## Ausgangslage

Im Wohnungsbau konnte in den letzten Jahren der Wärmebedarf (insbesondere der Heizwärmebedarf) deutlich gesenkt werden, dies vor allem bei Neubauten, aber auch bei Sanierungen. Beim Strombedarf hingegen konnte kaum eine Verringerung festgestellt werden. Wärme wird meist immer noch mit fossilen Energieträgern bereitgestellt. Das Potential für die gleichzeitige Stromerzeugung als Mittel zur Reduktion des primären Energiebedarfes wird noch zuwenig ausgenützt.

Der Einsatz von kleinen dezentralen Brennstoffzellengeräten stellt eine Möglichkeit der Gebäudetechnik für nachhaltige Gebäude im Sinne der 2000-Watt-Gesellschaft dar, vor allem bei der Verwendung von erneuerbaren gasförmigen Energieträgern wie beispielsweise Biogas. Brennstoffzellensysteme stehen aber damit auch in einer Konkurrenzsituation zu Solarsystemen, insbesondere zu thermischen Systemen (Sonnenkollektoren).

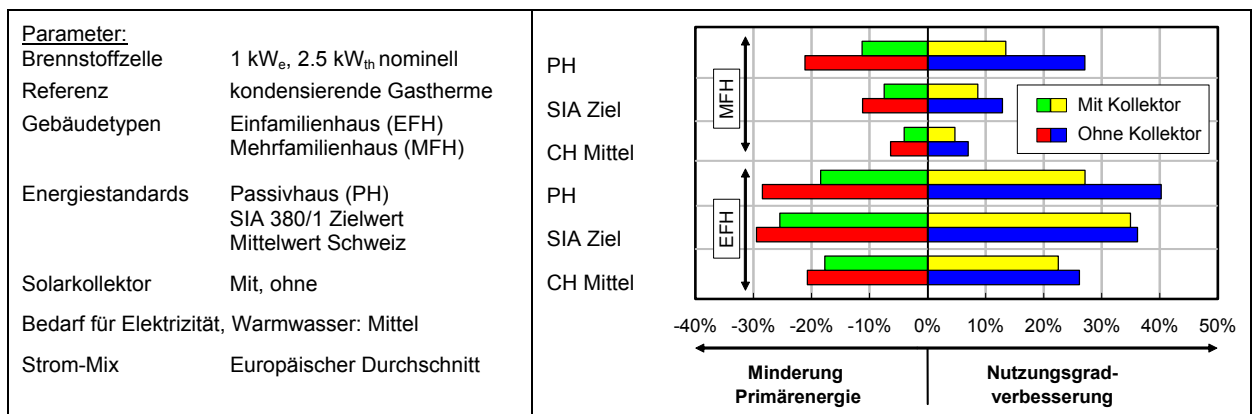
## Ziel und Inhalt des Vorprojektes

Ziel dieser Vorstudie war es, zur Klärung der Frage beizutragen, welche Rolle Brennstoffzellengeräte in der lokalen Energieversorgung von Wohngebäuden in Zukunft spielen werden, und erste Hinweise für optimale Konzepte und Anwendungsbereiche dieser Geräte geben zu können. Für einen eingeschränkten Satz von Gebäudetypen und Nutzerprofilen wurde mittels Gebäudesimulationen der Primärenergiebedarf von ergasbetriebenen Brennstoffzellengeräten bestimmt, und dabei der Einfluss weiterer Grössen wie Speichervolumen und Regelung dargestellt.

## Die wichtigsten Resultate

Im Vergleich zum Fall kondensierende Gastherme und Strom ab Netz ergeben sich mit den untersuchten Brennstoffzellengeräten für alle Gebäudetypen ein niedrigerer Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie und ein erhöhter entsprechender Primärenergienutzungsgrad, siehe untenstehende Figur.

Die niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf und die höchsten Werte für den Primärenergienutzungsgrad werden dort erreicht, wo in der Jahressumme der Elektrizitätsbedarf des Gebäudes möglichst gut mit der total generierten elektrischen Energie des Brennstoffzellengerätes übereinstimmt.



## Die wichtigsten Schlussfolgerungen

Das Brennstoffzellengerät (BZG) soll so dimensioniert werden, dass der Strombedarf des Gebäudes im Jahresmittel möglichst vollständig mit dem BZG gedeckt werden kann (bei Deckung des Restwärmebedarfes mit der kondensierenden Gastherme).

Für die Gebäudetypen mit niedrigem Heizwärmebedarf erreicht das hier definierte, modulierende Brennstoffzellengerät im (berücksichtigten) wärmegeführten Betrieb nur sehr wenige Volllaststunden, und ist somit für Niedrigenergie-Einfamilienhäuser schon eher überdimensioniert.

Die Kombination mit einem Solarkollektor reduziert den Primärenergiebedarf nur unwesentlich, weil wärmegeführt die Volllaststunden des Brennstoffzellengerätes wohl deutlich reduziert werden, andererseits aber mehr Strom (mit einem hohem Primärenergiefaktor) ab dem Netz bezogen werden muss.

## Ausblick

Die hier begonnen Arbeiten werden im nun anlaufenden, internationalen IEA Projekt Annex 42 „The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems“ weitergeführt werden.



# Inhalt

Nomenklatur .....	2
Vorwort .....	3
1 Einführung .....	5
1.1 Die Vision der 2000-Watt-Gesellschaft	5
1.2 Gebäudeintegrierte Wärme-Kraft-Kopplung: Stand der Technik	7
2 Fragestellung .....	9
3 Ziele .....	10
3.1 Generelle Ziele	10
3.2 Zielsetzung dieses Vorprojektes	10
4 Methodik .....	11
4.1 Vorgehen	11
4.2 Übersicht über berücksichtigte Parameter und Fälle	11
5 Beurteilungskriterien .....	13
5.1 Primärenergie und CO <sub>2</sub> -Emissionen	13
5.2 Primärenergienutzungsgrad	14
5.3 Betrieb der Brennstoffzellen	14
5.4 Abgrenzung	14
6 Randbedingungen .....	15
6.1 Klima	15
6.2 Systemgrenzen	15
6.3 Gebäude	15
6.4 Bedarfsprofile	17
7 Energieversorgung .....	20
7.1 System	20
7.2 Gastherme	20
7.3 Brennstoffzelle vom Typ SOFC	20
7.4 Brennstoffzelle vom Typ PEFC	21
7.5 SOFC und PEFC in Kombination mit Solarkollektor-Anlage	21
7.6 Speicher	22
7.7 Regelung	22
8 Beschreibung der untersuchten Fälle .....	24
9 Resultate .....	26
9.1 Vergleich SOFC mit kondensierendem Gaskessel	26
9.2 Kombination mit Solarkollektor	29
9.3 PEFC System	30
9.4 Einfluss der Abgaswärmerückgewinnung	31
9.5 Einfluss des elektrischen Wirkungsgrades der SOFC	32
9.6 Grösse des Speichers	32
9.7 Einfluss der Regelung	34
10 Zusammenfassung Erkenntnisse und Schlussfolgerungen .....	35
10.1 Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie	35
10.2 CO <sub>2</sub> - Emissionen	35
10.3 Auslegung und Betrieb FC	35
10.4 Ausblick	36
11 Referenzen und Literatur .....	37
11.1 Referenzen	37
11.2 Weiterführende Literatur	39





# Nomenklatur

## Abkürzungen

BWW	Brauchwarmwasser
BZ	Brennstoffzelle
BZG	Brennstoffzellengerät
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
NG	Erdgas (Natural gas)
PEFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (Polymer Electrolyte Fuel Cell)
PH	Passivhaus
SOFC	Feststoff Brennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell)
UCPTE	Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité, Luxembourg

## Parameter

E	Nutzenergiebedarf pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche und Jahr	MJ/m <sup>2</sup> .a
PE	Nicht erneuerbare Primärenergie pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche und Jahr	MJ/m <sup>2</sup> .a
P <sub>ef</sub>	Primärenergiefaktor (Faktor Primär- zu Endenergie)	-
η <sub>PE</sub>	Primärenergienutzungsgrad	-

## Indices

BWW	Brauchwarmwasser
E, e	Elektrisch
EI	Strombedarf
EI-Netz	Vom Netz bezogener Strom
EI-Plus	Netto Überschuss von ins Netz eingespeistem Strom
H	Raumheizung
PE	Primärenergie
TH, th	Thermisch

## Vorwort

Im Rahmen von "novatlantis – Nachhaltigkeit im ETH-Bereich" werden Forschungsprojekte zur nachhaltigen Entwicklung initiiert und gefördert. Es ist ein besonderes Anliegen des ETH-Bereiches, diese Strategie einerseits als Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis und andererseits als Erfahrungsgewinn für die Forschung zu nutzen.

In der Stadt und der Region Basel soll die Vision der 2000-Watt-Gesellschaft im Projekt "2000 Watt-Gesellschaft Pilotregion Basel" an konkreten Objekten und Stadtgebieten, und in Form von wegweisenden Projekten und Initiativen umgesetzt werden, dies in den Bereichen Gebäude und Verkehr/Mobilität.

Im Gebäudebereich stellt sich die wesentliche Frage, welche Hausenergieversorgungssysteme für das nachhaltige Gebäude der Zukunft am meisten Potential zur Primärenergieeinsparung mit sich bringen und damit aussichtsreiche Kandidaten für den Einsatz in der Pilotregion Basel sind.

In diesem Zusammenhang befasste sich das vorliegende Projekt im Umfang einer Vorstudie mit den Anwendungsmöglichkeiten von gebäudeintegrierten Brennstoffzellensystemen in Wohnbauten.

Diese Arbeit wurde anteilig gefördert durch novatlantis und die EMPA, denen wir beide für die Unterstützung dieser Vorstudie danken.

Die Arbeit unserer Kollegen Markus Koschütz und Andreas Pfeiffer über Hautechniksysteme für die Gebäude der 2000-Watt-Gesellschaft ermöglichte es uns, Ziele für den Energiebedarf von zukünftigen Gebäuden abzuleiten und so unsere Resultate auch im Kontext der Vision der 2000-Watt-Gesellschaft beurteilen zu können.

Den Kontakten mit der Industrie, namentlich Sulzer Hexis, Sulzer Innotec und Siemens Building Technologies, und mit Energieversorgern, namentlich Industrielle Werke Basel (IWB) und Gasverbund Mittelland (GVM), verdanken wir wertvolle Hinweise, zuerst für die Bestandesaufnahme, und dann für die Definition und die Lancierung eines IEA Projektes, in dem die in dieser Arbeit angeschnittenen Themen vertieft behandelt werden sollen.

Viktor Dorer und Robert Weber



# 1 Einführung

## 1.1 Die Vision der 2000-Watt-Gesellschaft

Das Aufhalten des Klimawandels ist eine vordringliche Herausforderung für die Gesellschaft. Die Studie [1] des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zeigt, dass eine längerfristige Stabilisierung der CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre auf 550 ppmv notwendig ist, damit ein mittlerer globaler Temperaturanstieg von 2.5 Kelvin nicht überschritten wird. In Fachkreisen wird vermutet, dass eine Erwärmung in dieser Grössenordnung noch keine Lebensbedrohung für spätere Generationen darstellt.

Aus den CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien der IPCC Studien [2], [3], [4], welche zu einer Stabilisierung bei 550 ppmv führen, lässt sich ein globales Energieverbrauchsszenario für die fossilen Energieträger ableiten. Erste Ansätze zur Quantifizierung eines möglichen Energieverbrauchsszenarios sind in der Studie von Kesselring und Winter [5] zu finden. Diese greifen erstmals den Begriff einer 2-kW-Gesellschaft auf und postulieren deren technische Machbarkeit durch energieeffiziente Umwandlung, Minimierung von nicht erneuerbaren und Maximierung von erneuerbaren Energien. Aus den Untersuchungen von Goldemberg [6] und Suarez [7] kann entnommen werden, dass ein minimaler Energiebedarf von 2000 Watt pro Person nötig ist, um Wohlstand, wirtschaftliches Wachstum und eine hohe Lebensqualität zu gewährleisten.

Im Jahr 1998 wurde die Idee einer 2000-Watt-Gesellschaft in der „Strategie Nachhaltigkeit im ETH-Bereich“ aufgegriffen (ETH-Rat [8]). Spreng et al. [9] zeigen, dass die Limite von 63 GJ Primärenergie pro Person und Jahr oder umgerechnet 2000 Watt pro Person aus ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Sicht Sinn machen. Ferner wird die These aufgestellt, dass sich der Energieverbrauch pro Person als grober Indikator für die Nachhaltigkeit eignet.

Aus dem globalen Energieverbrauchsszenario können nun separate Szenarien für die einzelnen Makroregionen abgeleitet werden. Ermöglicht wird dies durch das Szenario C1 aus den globalen Energieperspektiven des World Energy Council (WEC) [10]. Dieses Szenario verfolgt ein ähnliches ökologisches Ziel wie die 2000-Watt-Gesellschaft.

Der für die Schweiz abgeleitete Absenkpfad, welcher in Fig. 1 dargestellt ist, basiert auf den IPCC Studien [2], [3], [4] sowie dem zukünftigen Energieversorgungsmix aus [10]. Daraus ist ersichtlich, dass im Jahr 2050 eine fossile 2000-Watt-Gesellschaft erreicht werden muss und im Jahr 2200 weniger als 500 Watt aus fossilen Energiequellen stammen dürfen. Um den minimalen Energiebedarf von 2000 Watt zu decken sind über 1500 Watt aus erneuerbaren Energiequellen notwendig.

Brennstoffzellen können bereits heute einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten und bilden eine wichtige Grundlage für eine zukünftige erneuerbare Energieversorgung.

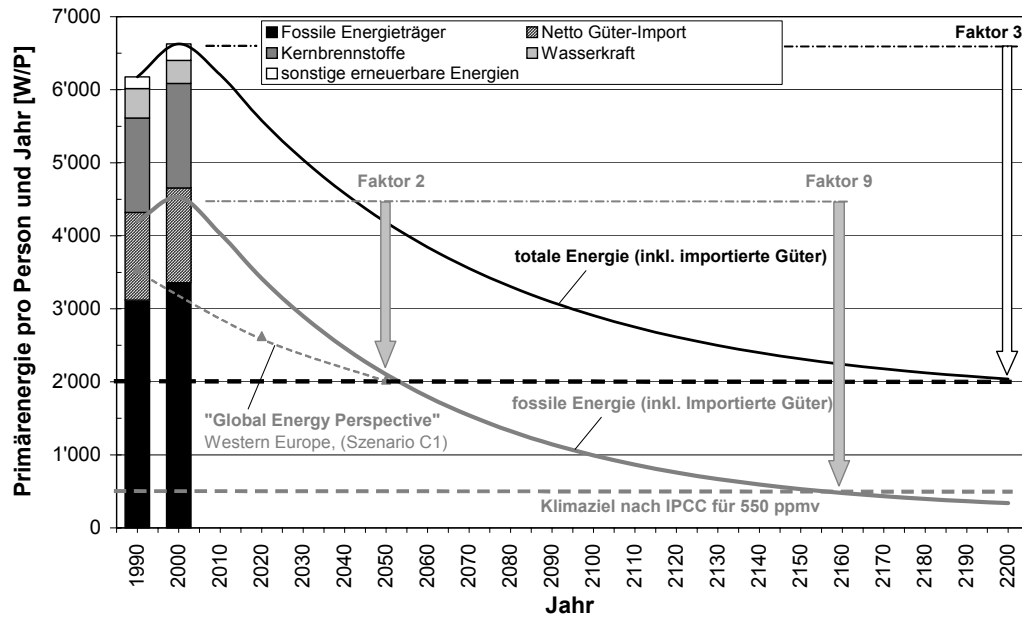


Fig. 1: Szenario für den Primärenergieverbrauch pro Person und Jahr für die Schweiz nach der Vision der 2000-Watt-Gesellschaft

Wie die Fig. 1 zeigt, ist eine Reduktion der fossilen Primärenergie um den Faktor 2 bis zum Jahr 2050 nötig. Langfristig wird gar ein Rückgang der fossilen Energie um den Faktor 8 bis 10 und für die gesamte Primärenergie um den Faktor 3 verlangt. Der Primärenergieverbrauch für das Bewirtschaften, Erstellen und Sanieren aller Schweizer Bauten beträgt zum heutigen Zeitpunkt nach Koschütz und Pfeiffer [11], welche die Auswirkung verschiedener Gebäudetechnik-Systeme auf die Zielerreichung untersucht haben, 3450 Watt pro Person. In Analogie zu dieser Studie wird mit einer proportionalen Reduktion aller Verbrauchergruppen gerechnet. Die Tab. 1 zeigt, welche Zielwerte in der Schweiz bis zu welchem Zeitpunkt zu erreichen sind, um die Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft zu erfüllen.

Tab. 1: Zielwerte des Primärenergieverbrauchs in der 2000-Watt-Gesellschaft nach [11]

Primärenergieverbrauch (PE) pro Person und Jahr [W/P]		Jahr 2000	Jahr 2050	Jahr 2150 bis 2200
Modell Schweiz	PE total	6630	4000	2000
	PE fossil	4530	2000	500
Bausektor <sup>1</sup>	PE total	3450	2080	1040
	PE fossil	2050	905	225
Wohnbauten <sup>2</sup>	PE total	1730	1045	520
	PE fossil	1050	<b>465</b>	<b>115</b>

Setzt man für die durchschnittliche Energiebezugsfläche (EBF) pro Person den schweizerischen Mittelwert von 58 m<sup>2</sup> ein, und nimmt man den Anteil an Wohnbauten im gesamten Baubestand als zeitlich konstant an, ergeben sich als Zielwerte für den jährlichen Bedarf an fossiler Primärenergie für Wohngebäude rund 253 MJ/m<sup>2</sup>EBFa im Jahr 2050 und 63 MJ/m<sup>2</sup>EBFa im Jahr 2150 bis 2200.

Zum Vergleich: Ein EFH Passivhaus weist einen Heizenergiebedarf von ca. 44 MJ/m<sup>2</sup>EBFa und einen Strombedarf von 53 MJ/m<sup>2</sup>EBFa, wobei es sich in diesem Fall um Nutzenergie und nicht um fossile Primärenergie handelt.

<sup>1</sup> Für Betrieb, Erstellung und Sanierung (direkt und indirekt)

<sup>2</sup> Nur für den Betrieb, ohne Erstellung und Sanierung (direkt und indirekt)

## Die 2000-Watt-Gesellschaft, Pilotregion Basel

In der Stadt und der Region Basel soll die Vision der 2000-Watt-Gesellschaft an konkreten Objekten und Gebieten und in Form von wegweisenden Projekten und Initiativen umgesetzt werden, und dies sowohl im Bereich Gebäude als auch im Bereich Verkehr/Mobilität.

Im Gebäudebereich stellt sich die wesentliche Frage, welche Hausenergieversorgungssysteme für das nachhaltige Gebäude der Zukunft am meisten Potential zur Primärenergieeinsparung mit sich bringen und damit aussichtsreiche Kandidaten für den Einsatz in der Pilotregion Basel sind. In diesem Zusammenhang hat sich das vorliegende Projekt mit gebäudeintegrierten Brennstoffzellensystemen befasst.

### 1.2 Gebäudeintegrierte Wärme-Kraft-Kopplung: Stand der Technik

Im Vergleich zum Gebäudebestand konnte in neuen Gebäuden der Heizwärmebedarf deutlich gesenkt werden. Ein grösserer und tendenziell steigender Bedarf besteht noch für elektrische Energie. Daher sollten in Zukunft hochwertige Energieträger nicht ohne Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) genutzt werden, d.h. der Exergieverlust soll möglichst gering sein. Unter Umständen kann es von Vorteil sein, die benötigte Restwärme selbst in Niedrigenergiegebäuden nicht mit Wärmepumpen sondern durch Klein-Blockheizkraftwerke (Klein- BHKW) zu erzeugen. Brennstoffzellengeräte für die Hausenergieversorgung stehen dabei im Vordergrund. Vor allem wenn erneuerbare Energieträger (Gas aus Biomasse, Wasserstoff) eingesetzt werden können, stellen sie eine Möglichkeit der nachhaltigen Gebäudetechnik mit grossem Potential dar.

Unverändert gross oder sogar zunehmend ist in Wohnbauten der Energiebedarf für Brauchwarmwasser. Kühlung wird zunehmend ein Thema. Multifunktionale Kompaktanlagen (heizen/kühlen, lüften, Heisswasser) mit integrierter Wärmepumpe kommen auf (Buehring [13]). Das Zusammenspiel und die Integration von solchen Systemen mit aktiven Solarsystemen (Solarkollektoren, Photovoltaik) sind von Interesse.

Die Brennstoffzellen sind einem hoch kompetitiven Umfeld zu den bestehenden, traditionellen Heizsystemen wie Brennwertkessel oder Wärmepumpen, und – für erneuerbare Energien – thermischen und photovoltaischen Solarsystemen sowie Holzofen ausgesetzt (Micro-Map Study [12]). Allerdings können sich diese verschiedenen Systeme nicht nur gegenseitig verdrängen, sondern auch sinnvoll ergänzen.

Dem grossen Potential von Brennstoffzellenheizgeräten steht auch eine Reihe von Nachteilen gegenüber, die bei einer neutralen Beurteilung ebenfalls berücksichtigt werden müssen:

- Stand der Technik Hohe Investitions- und ev. auch hohe Wartungskosten.
- Bedarfsschwankungen für Elektrizität und Wärme im Gebäude führen zu Teillastbetrieb und häufigen Laständerungen, welche von den BZ nur zum Teil aufgefangen werden können.
- Kleinere elektrische Wirkungsgrade als bei Grossanlagen.
- Beschleunigte Alterung wegen Gasverunreinigungen oder Abschaltung.

Die EU hat eine Reihe von Beschlüssen gefasst, mit denen erneuerbare Energien und die entsprechenden Technologien auf breiter Basis gefördert werden sollen [14] – [20].

Eine Richtlinie über die Förderung der Wärmekraftkopplung (WKK) ist Mitte 2002 veröffentlicht worden [21]. Diese verfolgt das Ziel, in der EU den Anteil der Stromproduktion mittels WKK von 9% im Jahre 1994 auf 18% im 2010 zu erhöhen. Die Verordnung unterstützt speziell dezentrale Kleingeräte, welche mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden.

Auch im 6. Forschungsrahmenprogramm der EU ist die dezentrale Stromproduktion mittels WKK und insbesondere Brennstoffzellen mit Hilfe erneuerbarer Energien, sowohl bei den kurzfristigen als auch den langfristigen Schwerpunkten, aufgeführt.

Auf nationaler Ebene wird Forschung im Bereich WKK und Brennstoffzellen vor allem in den BFE Programmen „Umwelt- und Abwärmenutzung, WKK (UAW)“ und „Brennstoffzellen“ gefördert. Systemfragen lassen sich aber auch im Programm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden (REN)“ einordnen. Die öffentliche Forschung konzentriert sich im Bereich WKK aber auf grössere Anlagen [22]. So konnte z. B. mit einem an der ETH entwickelten Erdgas betriebenen 200 kW BHKW Gasmotor (Swiss

Motor) mit sehr tiefen Emissionen ein elektrischer Wirkungsgrad von über 40 % demonstriert werden [23].

Einen guten Überblick über die allgemeinen Forschungsaktivitäten bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen geben die Unterlagen der Brennstoffzellen- Konferenzen in Luzern [24],[25]. Anwendungsmöglichkeiten speziell für Brennstoffzellen mit erneuerbaren Energieträgern (insbesondere Biogas) wurden z.B. an den Symposien in Steyr [26] und Amsterdam [27] behandelt.

Testeinrichtungen für BZ sind nicht nur bei verschiedenen Herstellern vorhanden (Sulzer Hexis, Vaillant- Plug Power), sondern auch in Forschungsinstitutionen wie z.B. bei der DLR (D), beim Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg ZSW (D) oder an der FH Biel (CH). Einige Energieversorgungsunternehmen betreiben Testgebäude (z.B. Gas de France, Ruhrgas) und in Deutschland wurden grosse Feldtestprogramme mit BZ-Geräten gestartet (EnBW und Ruhrgas u.a. mit Geräten von Sulzer Hexis und Vaillant), die wissenschaftlich begleitet werden. In einem EU-Projekt werden 35 Geräte von Vaillant als virtuelles Kraftwerk betrieben [28].

Der heutige Stand der Informationstechnologie erlaubt es, mit relativ kleinem Aufwand über lange Distanzen und an verschiedenen Standorten Daten zu erfassen. So überwacht z. B. Sulzer Hexis den Betrieb aller aktuell ausgelieferten Einheiten zentral von Winterthur aus. Dies ermöglicht zudem ein rasches eingreifen im Störfall.

Die zukünftige Rolle der Brennstoffzelle in der Energieversorgung von Gebäuden wird auch in den Projekten „Negev“ [29] und „Dispover“ [30] untersucht. In „Dispover“ werden Regelstrategien und – methoden für zukünftige dynamische Strompreise entwickelt. Das Anwendungspotential von Brennstoffzellengeräten in Niedrigstenergiegebäuden, im speziellen nach Passivhaus Standard, sind von Bürger [31] und Vetter [32] dargestellt.

Energetische und ökologische Aspekte von dezentralen WKK- Anlagen im allgemeinen sind z.B. von Entress [33] oder Pehnt [34] behandelt. Für gebäudeintegrierte BZ-Systeme werden nun ökonomische und ökologische Fragen und Evaluationen angegangen, z.B. im Projekt „Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale Stationäre Brennstoffzellen“ in Deutschland [35]. Viele Arbeiten befassen sich auch mit den Aspekten des Marktes für Brennstoffzellengeräte, so z.B. Bokämper [36] oder Krammer [37].

Mit der Systemintegration, der Auslegung oder der Regelung solcher Anlagen befassten sich bisher erst wenige Arbeiten. Fragen des Energiemanagements von WKK- Systemen in Kombination mit Systemen für erneuerbare Energien (thermische und PV-Solarsysteme, Wärmepumpen-Systeme) wurden modelliert von Hube [38].

Für die Charakterisierung von Brennstoffzellen sind schon viele Modelle erstellt worden. Die meisten beschreiben dabei im Detail die elektrochemischen Vorgänge in der Zelle und im Stack, und die thermo-chemischen Prozesse in der Wasserstoffaufbereitung und in weiteren Komponenten des Brennstoffzellensystems (Sicré [39]). Modelle von Brennstoffzellensystemen wurden auch schon in Programme zur Berechnung von solarunterstützten BHKW integriert (Vetter [40]). Einfachere Modelle, angepasst an die Bedürfnisse der Gebäude- und Haustechniksystem-Simulation, wurden z.B. von Beausoleil- Morrison [41] beschrieben.



## 2 Fragestellung

Für die Nutzung erneuerbarer Energien zur Energieversorgung eines Wohngebäudes gibt es vielfältige Kombinationen von System- Möglichkeiten (Fig. 2). Eine optimale Lösung zu finden ist komplex und hängt von vielen Faktoren ab. Für eine gebäudeintegrierte dezentrale Strom- und Wärmeversorgung ist zudem sowohl für die Wärme als auch für die Elektrizität ein Energiemanagement nötig.

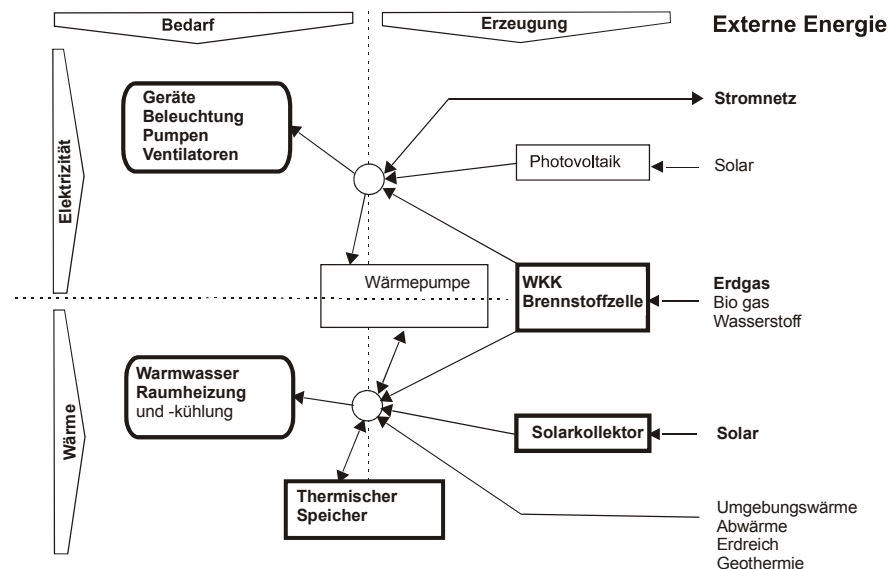


Fig. 2: Energiemanagement, welches Bedarf und Erzeugung von Wärme und Strom für ein typisches Hausenergiesystem darstellt. Die in diesem Vorprojekt betrachteten Energieträger und Systeme sind fett dargestellt.

Im Bezug auf eine gebäudeintegrierte, dezentrale Strom- und Wärmeversorgung von nachhaltigen Wohnbauten mittels Brennstoffzellensystemen stellen sich folgende Fragen:

- Welche Rolle spielen dezentrale Brennstoffzellengeräte in Haustechniksystemen für Gebäude der 2000-Watt-Gesellschaft?
- Welche Chance besteht für die Primärenergiereduktion?
- Welche Kombinationen von Gebäudegrößen, Anlagengrößen, Speichergößen versprechen den grössten Erfolg?
- Bringen Lösungen mit Brennstoffzellengeräten im Verbund (Überbauung, Quartier) und/ oder die Kombination mit Saisonspeicher Vorteile gegenüber Einzelgerätelösungen?
- Welche Regelungsstrategien sind einzusetzen (Energiemanager)?
- Wie vergleichen sich Brennstoffzellengeräte mit anderen Klein- BHKW (Gasmotor, Stirling)?
- Unter welchen Randbedingungen (Standorte, Gebäudetyp, Wirkungsgrade der Brennstoffzellenanlage) ist die Kombination von Brennstoffzellensystemen mit Solaranlagen sinnvoll, unter welchen nicht (sinnvoll bezüglich Primärenergie, CO<sub>2</sub>-Emissionen, Kosten, Nachhaltigkeitsanforderungen generell)?
- Welche Einfluss haben weitere Randbedingungen?

## **3 Ziele**

### **3.1 Generelle Ziele**

Das grundlegende Ziel ist es, sinnvolle Konzepte für den Einsatz von Brennstoffzellensystemen, auch mit erneuerbaren Energien, zu definieren und das Potential dieser Technik als Haustechniksystem für nachhaltige Gebäude entsprechend den Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft darzustellen.

Für die dezentrale Energieversorgung von Gebäuden sollen daher die Auslegung und der Betrieb von Brennstoffzellensysteme im Bezug auf Primärenergie, Emissionen und Kosten untersucht und Möglichkeiten für den Einbezug erneuerbarer Energietechniken (insbesondere Solaranlagen) aufgezeigt werden. Der Einfluss von Versorgungsbereich (EFH bis Quartier) und Energieträger (Erdgas, Gas aus Biomasse, Wasserstoff) sollen analysiert und mit anderen Typen von Klein- BHKW verglichen werden. Im Rahmen des Projekts „Pilotregion Basel 2000-Watt-Gesellschaft“ sollen die Resultate in der Praxis umgesetzt und durch den pilotmässigen Einsatz von dezentralen Brennstoffzellen-Geräten evaluiert werden.

### **3.2 Zielsetzung dieses Vorprojektes**

#### **Technische Abklärungen und Evaluationen**

Ziel dieses Vorprojektes war es,

- kritische Aspekte und Themen beim Einsatz von Brennstoffzellen zu identifizieren,
- Brennstoffzellengeräte für verschiedene Gebäudetypen, Systemtypen und Nutzerprofile mittels Computersimulationen bezüglich Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoss zu evaluieren,
- die Interaktion des Brennstoffzellengeräts mit dem Wasserspeicher zu untersuchen,
- Kombinationen mit Systemen für erneuerbare Energien (Solarkollektor) zu evaluieren,
- daraus Erfolg versprechende Konfigurationen zu ermitteln,
- und die Resultate mit denjenigen für eine konventionellen Gastherme sowie eventuell für andere Klein- BHKW Geräten (Gasmotor, Stirling) zu vergleichen.

#### **Projekteingaben**

Ein weiteres Ziel dieses novatlantis Vor-Projektes war es, Forschungsprojekte zum Themenbereich „Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellensystemen“ im Sinne der oben aufgeführten generellen Ziele zu initiieren.

## 4 Methodik

In den nachfolgenden Kapiteln werden das Vorgehen und die Resultate der Vorstudie beschrieben.

### 4.1 Vorgehen

Für die Evaluation wurde folgendes Vorgehen gewählt:

1. Definition der zu evaluierenden Fälle (Konfigurationen).
2. Definition der zu berücksichtigenden Evaluationskriterien (Primärenergie, Primärenergienutzungsgrad und CO<sub>2</sub>-Emissionen).
3. Definition der entsprechenden Randbedingungen (Gebäudetyp, Belegung, Nutzerprofile etc.).
4. Modellierung für die Berechnung mit dem transienten Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS [42].
5. Simulationen einer Jahresperiode, Kontrolle der Resultate.
6. Auswertung bezüglich der Evaluationskriterien, Interpretation der Resultate und Ableiten von Schlussfolgerungen.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Parameter klar aufzeigen zu können, wurden immer nur Sensitivitäten bezüglich eines oder zwei Parameter analysiert.

Damit stellen die gewählten Konfigurationen keine optimalen Systeme dar, wie sie z.B. mit der Anwendung einer Multi-Kriterien-Optimierung gefunden werden könnten (siehe Burer [43] in einer Anwendung für Kraftwerks-Brennstoffzellenanlagen).

Allerdings wurden für jede gewählte Konfiguration die Regelungsstrategie und die entsprechenden Algorithmen so festgelegt, dass ein optimaler Betrieb im Bezug auf Wärmenutzung resultierte.

### 4.2 Übersicht über berücksichtigte Parameter und Fälle

Im Rahmen dieses Vorprojektes wurden nur wenige Einflussparameter und nur einige charakteristische Konfigurationen untersucht. Um zu allgemein gültigen Aussagen zu kommen, müssten natürlich wesentlich mehr Einflussparameter und eine umfassendere Anzahl von Klimadaten, Gebäudetypen, Systemkonfigurationen und Bedarfsprofilen berücksichtigt werden.

Für den Rahmen dieser Studie erscheint aber die getroffene Auswahl (Tab. 2) als umfassend genug.

Eine ausführliche Beschreibung der Parameter wird in den Kapiteln 6 und 7 gegeben.

---

*Tab. 2: In diesem Vorprojekt berücksichtigte Einflussparameter*


---

Klima	Basel- Binningen
Gebäudetypen	a) Einfamilienhaus (EFH) b) Mehrfamilienhaus (MFH)
Energiebedarf Gebäude	a) Energiebedarf entsprechend dem heutigen Schweizer Durchschnitt für bestehende Bauten b) Energiebedarf entsprechend SIA Zielwert für Neubauten c) Passivhaus-Standard
Belegung	3 Profile: a) EFH: 2 Personen, tagsüber abwesend b) EFH: 4 Personen Familie c) MFH: 12 Personen, 2*Profil a) und 2*Profil b), zeitlich versetzt
Warmwasser-Bedarf	Entsprechend der Belegung: 3 Profile: a) 2 Personen, tagsüber abwesend b) 4 Personen Familie c) 12 Personen Waschmaschine an Warmwasser angeschlossen.
Strombedarf	In Relation zum Energiebedarfslevel des Gebäudes
Brennstoffzellen-Geräte	a) SOFC Brennstoffzellengerät (1kW <sub>e</sub> ) b) PEM Brennstoffzellengerät (4.5.kW <sub>e</sub> ) c) SOFC mit erhöhtem elektrischem Wirkungsgrad
Zusatzwärme	a) kondensierende Gastherme b) thermische Solarkollektoren
Speichergrösse Warmwasser	a) 300 l / Wohnung b) 700 l / Wohnung c) 1000 l / Wohnung
Betriebsweise K-WKK	a) modulierender Betrieb b) start / stop- Betrieb
Regelung	Jede Konfiguration wurde wärmegeführt betrieben. a) prädiktive Regelung b) PI- Regelung
Brennstoff	Erdgas
Strom-Mix	Nicht erneuerbare Primärenergie für netzbezogene Elektrizität: a) Europäisches Mittel (UCPTE) b) CH-Mittel inkl. Import c) "state-of-the-art" G+D Kombikraftwerk

---

## 5 Beurteilungskriterien

### 5.1 Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die verschiedenen System-Konfigurationen wurden evaluiert in Bezug auf den jährlichen Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie und im Bezug auf die CO<sub>2</sub> - Emission. Die nicht erneuerbare Energie wird den Gebäuden in Form von Erdgas und Elektrizität zugeführt. Bei der Simulation der verschiedenen Systemkombinationen wurde die benötigte Endenergie berechnet. Für die Umrechnung der Endenergie in den Primärenergiebedarf werden Primärenergiefaktoren verwendet, in denen auch die Verteilverluste berücksichtigt sind.

Bei der Stromversorgung über das Netz sind der Primärenergiebedarf und die entsprechenden Emissionen abhängig vom Strom-Mix. Drei Typen von Strom-Mix wurden berücksichtigt:

- a) Europäisches Mittel gemäss UCPTPE [44] (UCTPE)
- b) Strom-Mix für die Schweiz inkl. Import (CH-Mittel)
- c) Gas- und Dampf-Kombikraftwerk gemäss heutigem Stand der Technologie (G+D)

Die in dieser Studie verwendeten Primärenergiefaktoren sind in Tab. 3 aufgeführt. Sie basieren auf den von Frischknecht [46] aufgeführten Werten. Sie beinhalten einen Faktor für den Transport der Energieträger von der Gewinnung bis zum Kraftwerk, ggf. den Wirkungsgrad, und einen Faktor für die Verluste im elektrischen Netz. Beispielsweise wurden für das G+D Kraftwerk ein elektrischer Wirkungsgrad von 58 %, ein Faktor für die Zuführung der Primärenergie zum Kraftwerk von 1.13 und ein Faktor von 1.10 für die Netzverluste eingerechnet. Der Faktor 1.10 für die Netzverluste wurde aber auch für lokal produzierte überschüssige elektrische Energie verwendet, da diese ja ins Netz eingespeist und von dort zu einem anderen Zeitpunkt wieder bezogen wird. Das Netz wirkt somit als fiktiver elektrischer Energiespeicher.

Tab. 3: Primärenergiefaktoren (Faktor Primärenergie zu Endenergie) und CO<sub>2</sub> - Emissionsfaktoren

	Strom-Mix für Niederspannung- Stromversorgung			Erdgas-Versorgung
PE-Faktor <i>pef</i> (Basis Hu) [MJ Primär- / MJ Endenergie]	UCPTPE/ESU	Schweiz inkl. Import	G & D Kraftwerk	
Erneuerbare Energien	0.25	0.61	0.00	0.00
Nicht erneuerbare Energien	3.36	2.48	2.14	1.13
CO <sub>2</sub> Faktor [kg/MJ Endenergie]	0.154	0.0418	0.1288	0.0072
CO <sub>2</sub> Faktor, mit Verbrennung [kg/MJ Endenergie]				0.0697

Die Graue Energie wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt. Auch andere Arten von Emissionen wie NO<sub>x</sub> und CO werden nicht berücksichtigt, da diese Emissionen in der Regel bei Brennstoffzellensystemen im Vergleich zu konventionellen Klein- BHKW mit Verbrennungsmotor deutlich niedriger sind (Tab. 4). Allerdings macht die Motorentchnik auch bei den Emissionen grosse Fortschritte (Swiss Motor und Stirling).

Tab. 4: Typische Schadstoffemission [47]

	Brennstoffzelle <sup>(1)</sup> mg/m <sup>3</sup>	Swiss Motor mg/m <sup>3</sup>	Stirling mg/m <sup>3</sup>	LRV mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	0- 5	1- 8	80	250
CO	0- 12	30	50	650

<sup>(1)</sup> Abhängig vom Typ der BZ

## 5.2 Primärenergienutzungsgrad

Um zu beurteilen, wie gut die eingesetzte nicht erneuerbare Primärenergie (bezogen auf zugeführtes Erdgas und Strombezug aus dem Netz) den Energiebedarf des Gebäudes deckt, wird ein Primärenergieausnutzungsgrad  $\eta_{PE}$  gemäss Gleichung (1) definiert:

$$\eta_{PE} = \frac{E_{El} + E_H + E_{WW} + E_{El-Plus}}{PE_{El-Netz} + PE_{NG}} = \frac{E_{El} + E_H + E_{WW} + E_{El-Plus}}{pef_{El-Netz} \cdot E_{El-Netz} + pef_{NG} \cdot E_{NG}} \quad (1)$$

$\eta_{PE}$  zeigt das Potential zur Nutzung der Primärenergie. Falls  $\eta_{PE}$  klein ist, geht ein grosser Teil der Primärenergie an die Umwelt verloren. Bei Werten um 1 wird die ganze Primärenergie im Gebäude verwertet (keine Verluste).

## 5.3 Betrieb der Brennstoffzellen

Für die Brennstoffzellen wurde ein modulierender Betrieb definiert. Dies wurde festgelegt, weil angenommen wurde, dass Abschaltvorgänge entweder zu hohen Energieverlusten oder zu einer vorzeitigen Alterung der Zellen führen (siehe Kap. 7.3). Um ein Indiz für einen ökonomischen Betrieb der BZ zu erhalten, wurden die Volllaststunden berechnet und die Summenhäufigkeit der Modulation dargestellt.

### Volllaststunden

Die Berechnung der Volllaststunden erfolgt mit:  $\text{Volllast- h} = (\text{Modulationsgrad [\%]} \cdot \text{h}) / 100$  [h]

### Summenhäufigkeit der Modulation

Von der Modulation wurde eine Summenhäufigkeit der stündlichen Durchschnittswerte erstellt und über 8760 Stunden ausgewertet.

## 5.4 Abgrenzung

Folgende Bereiche (fachlich, geographisch, etc.) wurden im Vorprojekt explizit ausgeschlossen:

Geographisch:	Durch die Wahl der Klimadaten beschränken sich die absoluten Werte der Ergebnisse auf Anwendungen in der Pilotregion Basel. Allerdings gilt der relative Vergleich der Ergebnisse auch für andere Gebiete im Schweizerischen Mittelland.
Technisch:	Elektrotechnische Details der Stromeinspeisung und der Anbindung von Brennstoffzellen-geräten an das elektrische Netz (Stromqualität) wurden nicht behandelt.
Beurteilung:	Es wurde nur die Betriebsenergie untersucht. Die graue Energie der verschiedenen Systeme wurde nicht berücksichtigt.
Wirtschaftlichkeit:	Die Wirtschaftlichkeit wurde nicht untersucht.

## 6 Randbedingungen

### 6.1 Klima

Für die Klimadaten wurden statistisch aufbereitete Messdaten von 10 Jahren, sogenannte DRY Daten (Design reference year) der Station Basel- Binningen verwendet. Damit sind DRY- Daten zwar keine reinen Messdaten, sie sind aber auf alle Fälle besser als rein synthetisch erzeugte Daten. Das in unserem Fall verwendete File stammt von der METEONORM 4.0. [48]

### 6.2 Systemgrenzen

Im Vorprojekt wurden nur dezentral versorgte Gebäude ohne lokale Verbunde angeschaut. In der Simulation sind die Grenzen so definiert, dass der Eintrag bzw. ein eventueller Austrag von nicht erneuerbarer Energie (Endenergie) in bzw. aus der Gebäudehülle übers das gesamte Jahr aufsummiert wird. Diese Endenergie wurde mit Hilfe von Primärenergiefaktoren (siehe Kap. 5.1) auf die benötigte oder ersetzte Primärenergie umgerechnet.

### 6.3 Gebäude

#### Gebäudetypen

Die Gebäudetypen wurden nach zwei Kriterien definiert:

- Grösse bzw. Nutzung des Gebäudes:
  - Einfamilienhaus (EFH)
  - Mehrfamilienhaus (MFH)
- Energie-Standard des Gebäudes:
  - Durchschnitt Schweiz. Diese Bezeichnung steht für ältere, bestehende Gebäude.
  - Zielwert SIA 380/1
  - Passivhaus-Standard

Der Minergie Standard wurde im Vorprojekt nicht gewählt, da dieser Standard vom Gesichtspunkt des Energieverbrauchs dem Passivhaus- Standard nahe kommt.

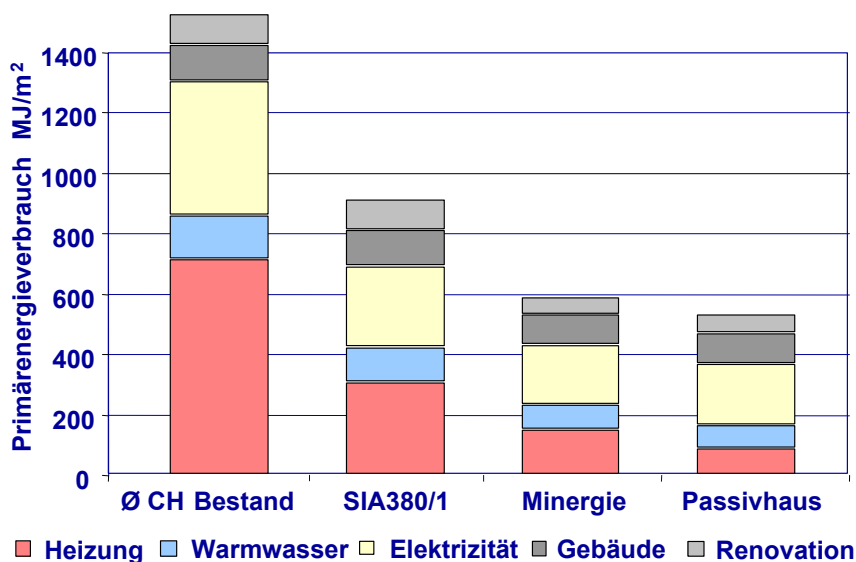


Fig. 3: (Quelle: White Paper 2000 Watt-society [52])

## Durchschnitt Schweiz

Tab. 5: Energiekennwerte nach SIA 380/1 Ausgabe 1988 [52] für Bauten vor der Sanierung

MJ/m <sup>2</sup> a	EFH	MFH
Heizenergiebedarf	425	450
BWW (nach SIA 385/3)	40 L/Pers (von 10 -60°C)	40 L/Pers (von 10 - 60°C)
Elektrizität	120	130
Luftwechsel	2.1 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> EBF	2.1 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> EBF

## Zielwert SIA 380/1

Es wurden die Energiekennwerte nach SIA 380/1 Ausgabe 2001 verwendet. Die Werte in Tab. 6 sind umgerechnet für die verwendete Gebäude-Geometrie.

Tab. 6: Energiekennwerte nach SIA 380/1 Ausgabe 2001 [54], Zielwerte

MJ/m <sup>2</sup> a	EFH	MFH
Heizenergiebedarf (Zielwert)	155 (EBF)	132 (EBF)
BWW (nach SIA 385/3)	40 L/Pers (von 10 -60°C)	40 L/Pers (von 10 -60°C)
Elektrizität	80	100
Luftwechsel	0,7 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> EBF	0,7 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> EBF

## Passivhaus

Der Passivhaus Standard [49] gründet auf deutschen Normen. Da die Definition der Energiebezugsfläche nicht mit der Schweizer Norm übereinstimmt, mussten die Energiekennwerte umgerechnet werden.

Tab. 7: Umgerechnete Energiekennwerte nach dem Passivhausprojektierungspaket PHPP 99 [49].

MJ/m <sup>2</sup> a	EFH	MFH
Heizenergiebedarf (PHPP99)	54 (Nutzfläche); 44,0 (EBF)	54 (Nutzfläche); 46.5 (EBF)
BWW (nach SIA 385/3)	40 L/Pers (von 10 -60°C)	40 L/Pers (von 10 -60°C)
Elektrizität (PHPP99)	64.8 /Nutzfläche; 52.8/EBF	64.8 / Nutzfläche, 55.6 / EBF
Infiltration in Zonen mit Türen	0.1 h <sup>-1</sup> = 0.1 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> EBF	0.1 h <sup>-1</sup> = 0.1 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> EBF

## Gebäudegeometrien

Die verwendete Gebäudegeometrie ist in Fig. 4 dargestellt. Es wurde ein dreistöckiges Gebäude angenommen, teilweise ins Erdreich gelegt. Der Grundriss einer Wohnung im MFH entspricht dem Grundriss des EFH.

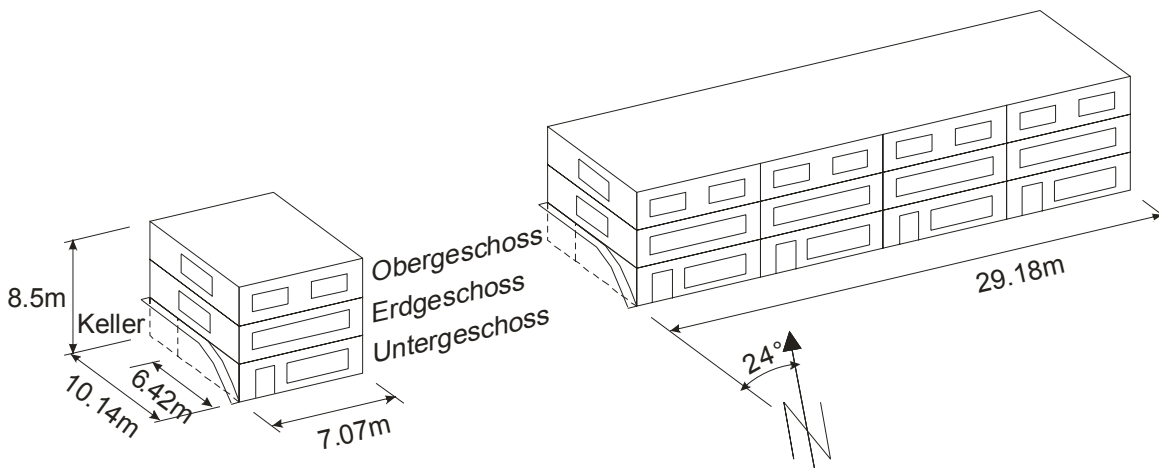


Fig. 4: Geometrie Nutzfläche



## Wärmeverteilung und Lüftung

Tab. 8: Eingesetzte Wärmeverteilung und Lüftung

Gebäudetyp	Wärmeverteilung	Lüftung
Durchschnitt CH	Radiator oder Konvektor, Strahlungsanteil 19%	Fensterlüftung Infiltration
SIA 380/1 Zielwert	Fussbodenheizung, ähnlich thermoaktivem Bauteilsystem	Fensterlüftung
Passivhaus	Luftheizung	Mech. Zu/Abluftanlage mit WRG

### 6.4 Bedarfsprofile

#### Belegung

Es wurden drei Belegungsprofile berücksichtigt:

- Familie mit 4 Personen
- Haushalt mit 2 Personen, beide Personen tagsüber abwesend
- Im MFH ist angenommen, dass 2 Wohnungen gemäss Profil a) und 2 Wohnungen gemäss Profil b) belegt sind, wobei ein zeitlicher Shift von 1h für die täglichen Abläufe und von 1 Woche für die Ferien eingeführt wurde.

Für das EFH ist Profil b) der Referenzfall. Profil a) wurde für Sensitivitätsanalysen eingesetzt.

Die Belegungsprofile wurden auf einer Wochenbasis definiert.

#### Warmwasserbedarf

Es wurden drei Typen von Warmwasserbedarfsprofilen entsprechend den Belegungsprofilen definiert.

Der durchschnittliche Warmwasserbedarf wird nach SIA 385/3 mit 40 Liter pro Person angenommen. Zudem wurde angenommen, dass die Waschmaschine mit Warmwasser aus dem Boiler gespeist wird. Dies ergibt einen zusätzlichen Warmwasserbedarf von ca. 36 Liter pro Woche.

#### Profil a) 4 Personen -Familie

Das Profil wurde abgeleitet aus "Simulation Warmwassersysteme" [45].

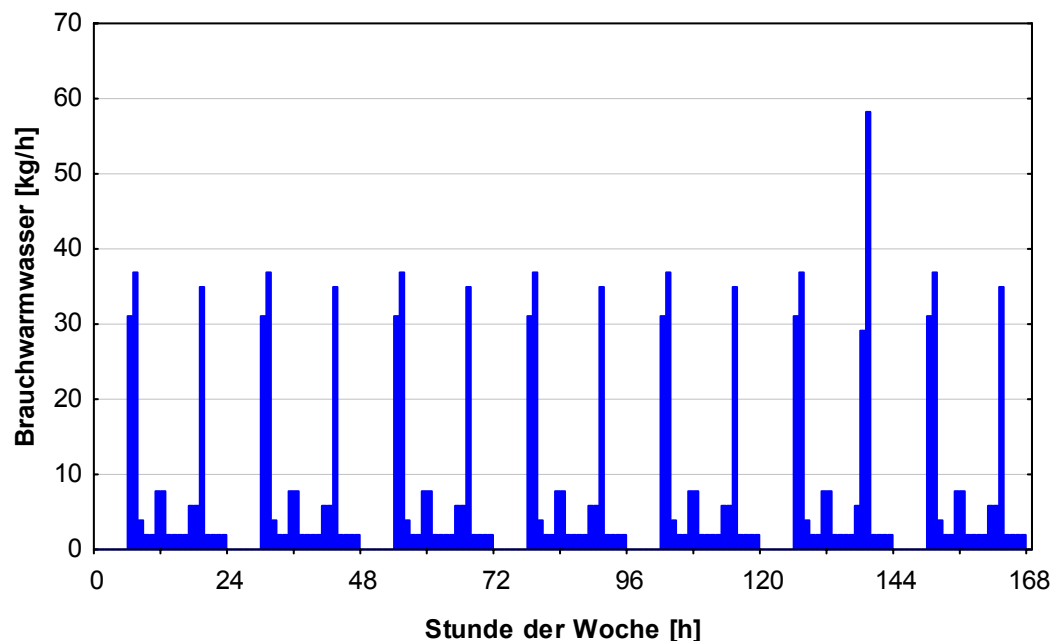


Fig. 5: 4 Personen Profil für den Brauchwarmwasserbedarf

### Profil a) 2 Personen

Dieses Profil wurde abgeleitet aus dem 4-Personen Profil unter Berücksichtigung der Abwesenheiten.

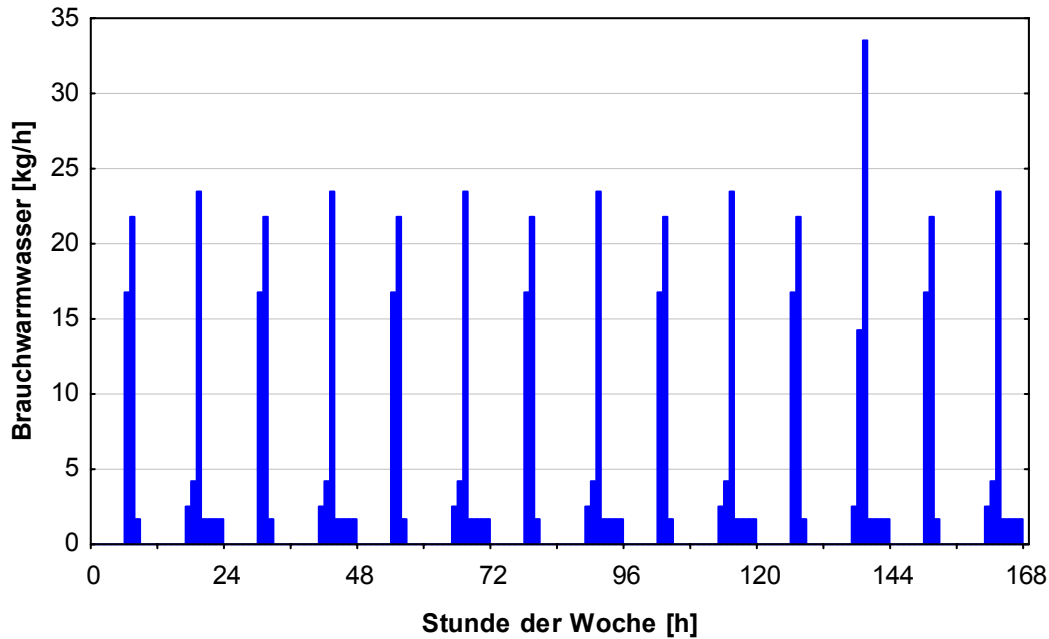


Fig. 6: 2 Personen Profil für den Brauchwarmwasserbedarf

### Profil c) 12 Personen

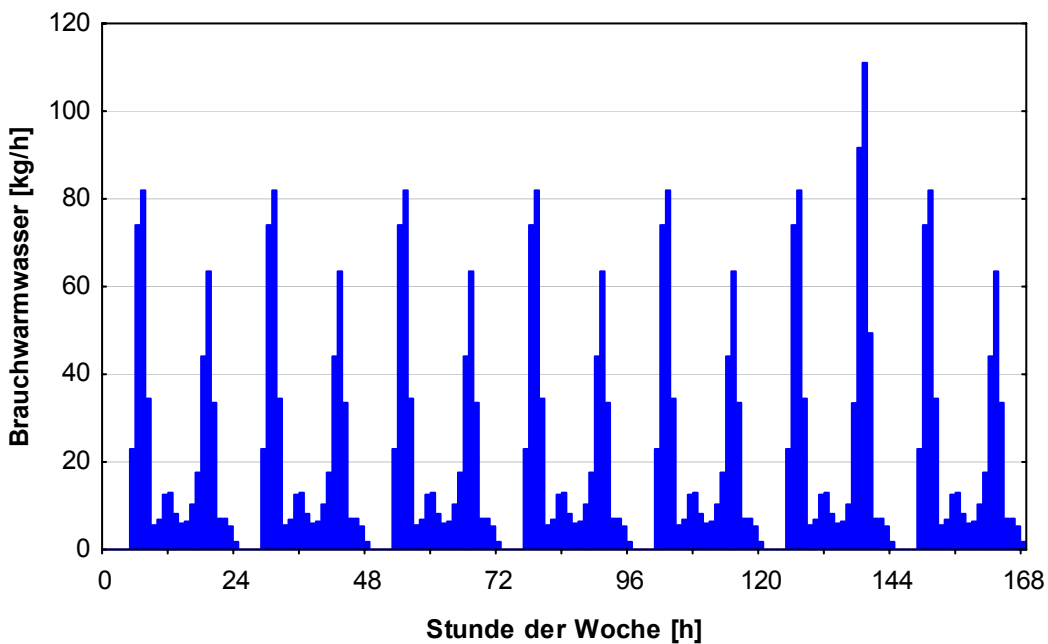


Fig. 7: 12 Personen Profil für den Brauchwarmwasserbedarf

### Strombedarf

Der Strombedarf ist der kumulierte Bedarf für Haushaltgeräte, Beleuchtung und für die mechanische Lüftungsanlage, bei der 0.4 W/ per m<sup>3</sup>/h geförderter Aussenluft angesetzt wurde. Die Beleuchtung wurde an das zur Verfügung stehende Tageslicht angepasst. Für den Geschirrspüler wurde elektrisches Aufheizen angenommen.

Zusätzlich wurde der Bedarf an die Vorgaben für jeden Gebäudetyp gemäss den Tab. 5 - 7 angepasst. Für jeden Gebäudetyp wurden individuelle Bedarfsprofile festgelegt.

### Waschmaschine

Für alle Gebäudetypen wurde angenommen, dass die Waschmaschine an das Brauchwarmwasser angeschlossen ist. Damit reduziert sich der Strombedarf pro kompletten Waschzyklus auf rund 0.5 kWh.

Nach topten.ch [50] werden in einem Einfamilienhaus pro Woche 4 Waschmaschinenladungen à 5 kg trockener Wäsche gewaschen. Pro Waschgang werden bei einer AAA Maschine ca. 1.0 kWh Strom verbraucht. Wenn man den Wasserverbrauch und die Spülgänge hochrechnet, kann gesagt werden, dass ca. 50% des Stromverbrauches auf das Konto der Wassererwärmung geht. Es gibt Maschinen, welche das Warmwasser direkt ab einem Boiler beziehen können. Lediglich die Differenz zur gewünschten Wärme wird noch nachgeheizt. In allen Simulationen dieser Vorstudie wurde dieser Fall angenommen, da die Brennstoffzelle mehr Wärme abgibt als Elektrizität.

### **Interne und externe Wärmelasten**

Der Strombedarf für Beleuchtung und Geräte sowie die Personen wurden zu 100% als interne Last berücksichtigt, Kochen und Waschen nur zu Anteilen.

Die externen Lasten wurden durch das TRNSYS Gebäudemodell berechnet. 60 bis 80% Sonnenschutz wurde verwendet, unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Tageslichtnutzung. Übertemperaturen in Raum wurden durch natürliches Ablüften auf die Komfortwerte reduziert.

## 7 Energieversorgung

### 7.1 System

Das Haustechniksystem besteht grundsätzlich aus einem Hausenergiesystem, einem Kombi-Speicher für Heizung und Warmwasser und der Regelung.

Folgende Energieversorgungssysteme wurden berücksichtigt: a) kondensierende Gastherme (als Referenzsystem), b) SOFC, c) PEMFC), d) Gastherme mit Solarkollektor, e) SOFC und Solarkollektor, f) PEMFC und Solarkollektor, g) SOFC mit angenommenem verbessertem elektrischem Wirkungsgrad.

Die Systeme wurden charakterisiert auf der Basis der elektrischen und totalen Effizienz in Funktion des Brennstoffverbrauches (Modulationsrate).

### 7.2 Gastherme

Die Leistungskurven der kondensierenden Gastherme wurden für alle EFH und für das Passiv- MFH auf der Basis des Modell THR 1-09 der Firma Elcotherm definiert. Diese Therme kann in einem weiten Bereich (0.9 – 9.0 kW) moduliert werden. Für das MFH mit dem Energiestandard "Zielwert SIA 380-1" wurde eine Gastherme der gleichen Baureihe verwendet. Diese kann ihre Leistung von 2.0 - 12.6 kW modulieren. Das MFH mit dem Energie Standard "Durchschnitt Schweiz" verbraucht sehr viel Wärme. Es wurde ein Gasbrenner eingesetzt, der die Leistung von 10.6 – 50.4 kW modulieren kann. Der Normnutzungsgrad von allen drei Brennern beträgt 108%. Die Wirkungsgradkurven gegen  $h_u$  stammen ursprünglich vom Modell THR 1-09, sie werden aber bei allen drei Brennern identisch verwendet und sind in Fig. 8 dargestellt. Die Auskühlverluste bei jedem Ausschaltvorgang wurden berechnet.

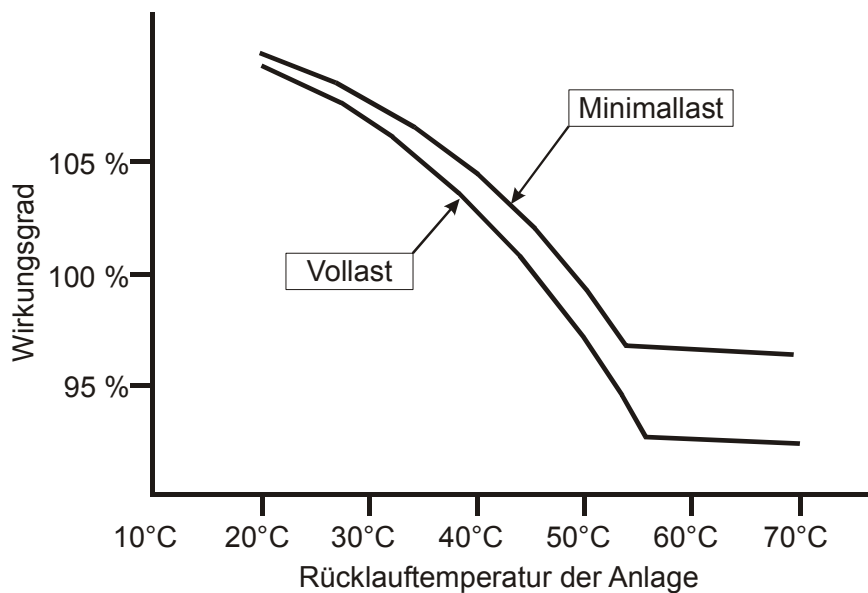


Fig. 8: Angenommene Wirkungsgradkurve der kondensierenden Gastherme

### 7.3 Brennstoffzelle vom Typ SOFC

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde das Brennstoffzellensystem als Blackbox modelliert, das als Input den Wärmebedarf und als Output die Elektrizitätsproduktion, den Brennstoffbedarf und den Modulierungsgrad liefert. Da die meisten Brennstoffzellengeräte sich noch im Prototypen- oder Vorserienstadium befinden, stehen genaue und verlässliche Leistungsdaten noch nicht zur Verfügung oder sind schnellen Änderungen unterworfen.

Deshalb wurden in dieser Arbeit Annahmen bezüglich des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades gemacht, die sich wohl an den heute zur Verfügung stehenden Prototypen und Vorseriengeräten orientieren, aber sich nicht auf spezifische Produkte beziehen.

Die für die SOFC angenommenen nominellen Leistungsdaten sind 1kW elektrisch und 2.5 kW thermisch. Die Wirkungsgrade elektrisch und gesamt (elektrisch + thermisch) sind in Fig. 9 wiedergege-

ben, und zwar in Funktion des Modulationsgrades (aktueller zu nominellem Brennstoffverbrauch). Die untere Modulationsgrenze wurde gemäss [51] auf 20 % festgelegt. Bei zusätzlichem Wärme-Bedarf wird automatisch eine zusätzliche Gastherme (siehe Kap. 7.2) zugeschaltet.

Eine grosse Modulationsbreite und die Fähigkeit zur sofortigen Leistungsanpassung (auf der Basis des 1h Zeitschrittes in der Simulation) wurden angenommen. Es wurden keine dynamischen Effekte für den Betrieb im Modulationsbereich berücksichtigt. Ebenso wurde beim Start/ Stopp- Zyklus keine Dynamik mit berücksichtigt, da beim EFH nur während den Ferien ein einziger und beim MFH kein entsprechender Zyklus simuliert wird. Hauptsächlich aus zwei Gründen wurde davon ausgegangen, dass Start/ Stop- Zyklen bei der SOFC möglichst zu vermeiden sind: Erstens, weil angenommen wurde, dass der Ausschalt- bzw. der Anfahrvorgang kann bis zu 48 Stunden in Anspruch nehmen kann, und zweitens, die weil angenommen wurde, dass dadurch die Degradation der Zellen zunimmt.

Der produzierte Strom wird direkt im Gebäude verwendet, Überschüsse werden ins elektrische Netz eingespeist. Ein zusätzlicher Strombedarf wird durch das Netz gedeckt. Damit wird das Netz als Ausgleich für Spitzenstromdeckung und Überschussrücklieferung genutzt.

Für die Sensitivitätsanalyse wurde zudem eine SOFC mit einem erhöhten elektrischen Wirkungsgrad (+10% über den gesamten Modulationsbereich) aber unverändertem Gesamtwirkungsgrad definiert (Fig. 9).

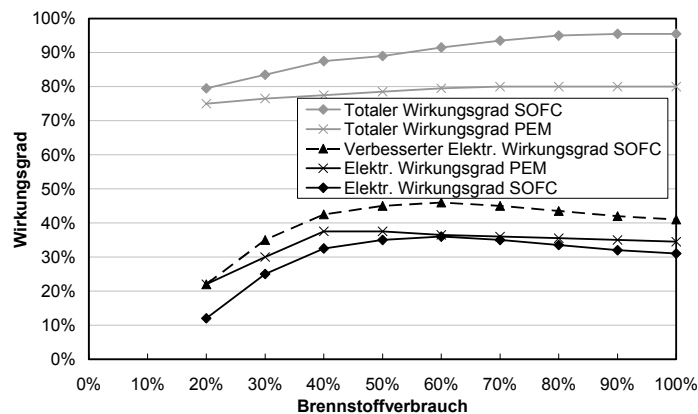


Fig. 9: Angenommene Wirkungsgrade elektrisch und total (elektrisch + thermisch) für SOFC and PEFC

#### 7.4 Brennstoffzelle vom Typ PEFC

Die PEFC- Brennstoffzelle erzeugt 0.6- 4.7 kW elektrische und 1.4- 6.2 kW thermische Leistung. Um einen allfälligen Spitzenbedarf an Wärme abzudecken, wurde eine zusätzliche Gastherme integriert (siehe Kap. 7.2). Die produzierte Elektrizität wird entweder direkt im Gebäude genutzt oder ins Netz zurückgespeist.

Eine grosse Modulationsbreite und die Fähigkeit zur sofortigen Leistungsanpassung (auf der Basis des 1h Zeitschrittes in der Simulation) wurden angenommen. Es wurden keine dynamischen Effekte für den Betrieb im Modulationsbereich berücksichtigt. Ebenso wurden die Verluste des Start/ Stop- Zyklus nicht berücksichtigt. Vor allem in Gebäuden mit einem hohen Anteil an Abschaltungen kann so der Primärenergiebedarf zu gering kalkuliert sein.

#### 7.5 SOFC und PEFC in Kombination mit Solarkollektor-Anlage

Die gleichen SOFC und PEFC wie in Kap. 7.3 und 7.4 beschrieben, wurden zusätzlich mit einem Solarkollektor kombiniert. Der Solarkollektor, ein typischer Flachkollektor ( $\eta_0 = 0.797$ ), wurde auf dem Dach entlang der Gebäudeachse aufgestellt angenommen. Der Neigungswinkel wurde für einen maximalen Wärmegewinn optimiert. Damit 60- 65% vom Brauchwarmwasser Solar erzeugt werden können, wurde 6 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Wohnung vorgesehen.

Die SOFC Brennstoffzelle wurde in der Sommerperiode während 125 Tagen abgeschaltet, da während dieser Zeit die Solarkollektoren meist genügend Wärme liefern. Um in dieser Zeit die Versorgung mit BWW sicherzustellen, konnte der Speicher elektrisch nachgeheizt werden. Die PEFC stellte ihren Betrieb während den 125 Tagen ebenfalls ein, allerdings konnte diese für allfällig benötigte Zusatzwärme zwischendurch gestartet werden.

## 7.6 Speicher

Die SOFC Brennstoffzelle war im Normalfall dauernd im Betrieb (siehe Kap. 7.3). Damit produzierte die Zelle auch dann Wärme, wenn diese nicht benötigt wurde. Andererseits ist die Wärmeproduktion der Zelle für Spitzen zu klein. Ein Speicher wird benötigt, um die Differenz in Produktion und Verbrauch zu überbrücken. Zudem wird er gebraucht um, falls vorhanden, die Wärme der Solarkollektoren aufzunehmen.

Der Speicher ist als Kombispeicher ausgeführt, d.h. er hat ein Element für das Brauchwarmwasser eingebaut. Betrieben wurde er so, dass sich möglichst eine Schichtung einstellen kann. Bei der Variante mit einem Volumen von 300l ist dieser Betrieb aber nicht immer gewährleistet.

Der Speicher ist mit einer 8 cm Steinwollisolation ( $\lambda = 0.04 \text{ W/m}$ ), welche keinerlei Wärmebrücken besitzt, gegen Auskühlung geschützt.

Der Standardspeicher weist eine Grösse von 700 l Wasser / Wohnung auf. Für den Gasheizungsbetrieb ist dies klar überdimensioniert. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde diese Grösse aber beibehalten. Für die Parameterstudie wurden zusätzlich die Speichergrössen 300 l und 1000 l Wasser / Wohnung eingesetzt.

## 7.7 Regelung

### Allgemeines

Es gibt einige Forderungen, welche durch eine Regelung abzudecken sind, z. T. unterscheiden sie sich nach dem Typ der eingesetzten Geräte:

- Jederzeit genügend Brauchwarmwasser.
- Erfüllen der Anforderung an den thermischen Komfort.
- Sanfte Änderungen der Modulation, d.h. eine ausgeglichene Belastung des Heizgerätes.
- Tiefe Vorlauftemperaturen, damit Abgaskondensation möglich wird.
- Wenig Abschaltzyklen und damit wenig Auskühlungsverluste (Gasheizung und PEMFC)
- Eine möglichst hohe Einsatzdauer für WKK- Unit, d.h. Zusatzbrenner sollten möglichst wenig eingesetzt werden.
- Keine überschüssige Wärme erzeugen (SOFC)

Die Forderung, dass möglichst kleine Änderungen in der Modulation anzustreben seien, ergibt sich aus der elektrischen Wirkungsgradkurve (Fig. 9). Eine Stunde Vollastbetrieb und eine Stunde Leerlaufbetrieb ergeben eine kleinere Effizienz als zwei Stunden in einem 60% Lastbetrieb.

### Prädiktive Regelung

Um die gestellten Forderungen optimal lösen zu können, wurde eine prädiktive Regelung emuliert. Die Simulation erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wurden die Verläufe des Wärmebedarfs, des Bedarfs an BWW und der Kollektorerträge bei einer Gebäudetemperatur von konstant 21° C berechnet.

In einem zweiten Schritt wurde die wirkliche Simulation durchgeführt. Die im ersten Schritt berechneten Verläufe wurden als "Prognosewerte" eingelesen. Die Vorhersageperiode wurde fest auf fünf Tage festgelegt. In der Praxis werden so korrekte Prognosen allerdings nie erreicht werden können. Um eine realistische Toleranzbreite zu erhalten, wurden diese Daten mit einem "weissen" Rauschen überlagert. Am Ende der Vorhersageperiode erreichten die Abweichungen bis zu  $\pm 20\%$  des ursprünglichen Wertes (lineare Zunahme). Zusätzlich wurde eine zufällige Zeitverschiebung für die Ereignisse eingeführt. Diese erreichte am Ende der Vorhersage eine Verschiebung von bis zu  $\pm 25\%$  (ebenfalls lineare Zunahme).

Ausgehend von der aktuellen Speicherbefüllung und den vorhergesagten Lasten, wird die Modulation so eingestellt, dass eine "Überfüllung" bzw. eine ungenügende Befüllung des Speichers verhindert werden kann. Ziel ist es, die Modulation so einzustellen, dass sie möglichst lange auf dem gleichen Wert bleibt. Da das BWW "zufällig" gezapft wird, muss geprüft werden, ob im obersten Bereich des Speichers immer genügend Wärme vorhanden ist. Falls diese Anforderung nicht erfüllt ist, wird mit Hilfe eines P- Reglers die Modulation erhöht (Fig. 10).

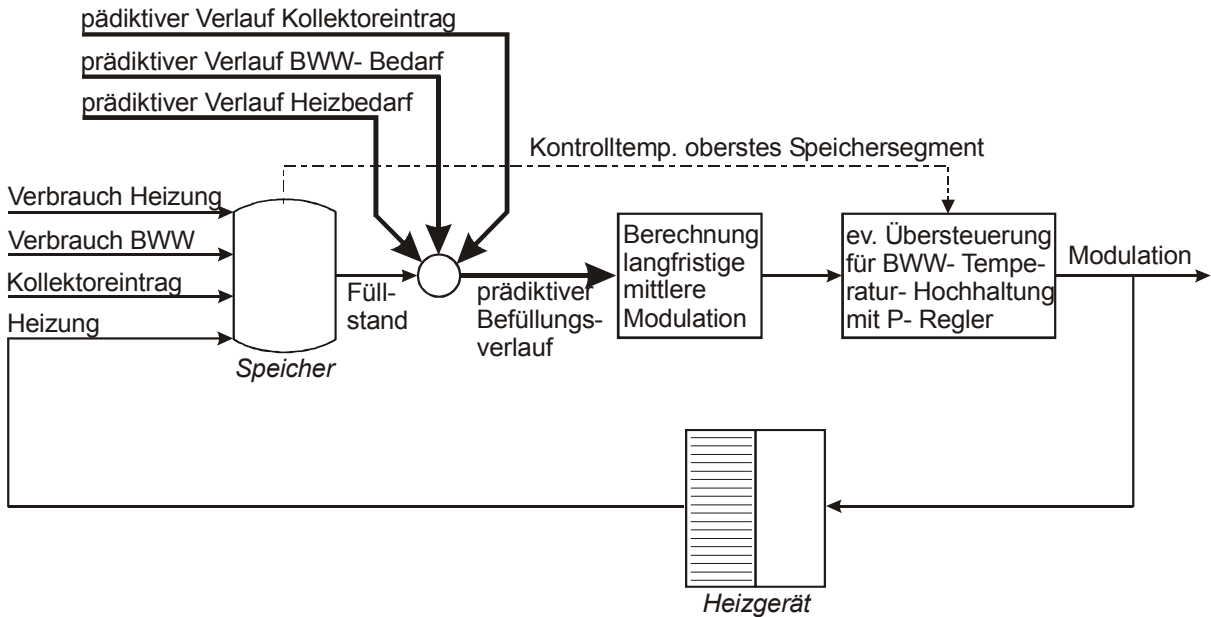


Fig. 10: Grobschema der prädiktiven Regelung

### PI – Regelung

Die PI- Regelung wurde zu Vergleichszwecken eingesetzt, standardmässig wurde die prädiktive Regelung verwendet.

Diese Regelung ist eine Kaskadenschaltung von einer Heizkurve und einem PI- Regler (Fig. 11). Die Heizkurve wird für jedes Gebäude individuell bestimmt. Mit der mittleren Aussentemperatur der letzten 24 Stunden und der Heizkurve wird ein Sollwert für die Speicherbefüllung errechnet. Daraus berechnet ein PI- Regler mit Anti- Wind- Up Funktion die Modulation der Brennstoffzelle. Auch bei diesem Regler wird aus Sicherheitsgründen ein zusätzlicher P- Regler für die BWW Temperatur nachgeschaltet.

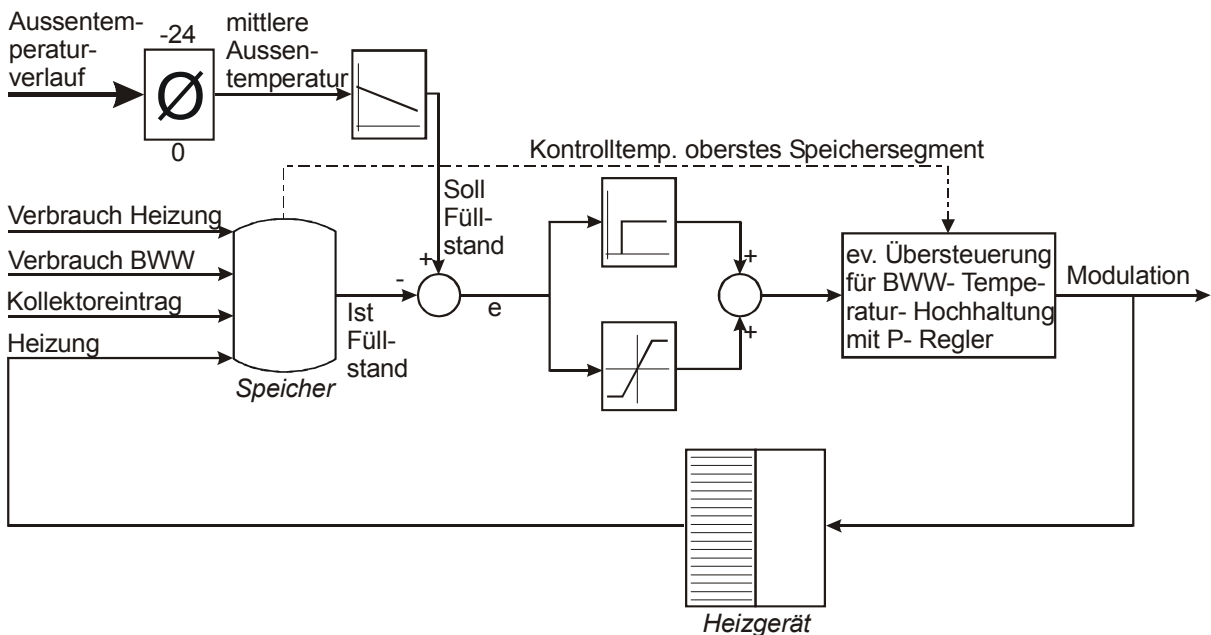


Fig. 11: Grobschema der PI- Regelung

## 8 Beschreibung der untersuchten Fälle

Aus der Fülle der möglichen Kombinationen und Konfigurationen musste eine überschaubare und dennoch aussagekräftige Menge von Fällen definiert werden. Dies geschah nach dem Prinzip, dass ausgehend von einem Basissystem oder einem Set von Basissystemen die verschiedenen Einflussfaktoren einzeln untersucht werden sollen.

Tab. 9: Übersicht über die simulierten Fälle

Titel Konfiguration	Gebäude	System	System-erweiterung	Speicher	Nutzerprofil	Regler
Gastherme	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	Gastherme		700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	Gastherme		2800 l	12 Personen	Prädiktiv
SOFC (Basis Fall)	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC		700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	SOFC		2800 l	12 Personen	Prädiktiv
PEFC	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	PEFC		700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	PEFC		2800 l	12 Personen	Prädiktiv
Gastherme mit Solarkollektor	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	Gastherme	6 m <sup>2</sup> Solar- kollektor	700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	Gastherme	24 m <sup>2</sup> So- larkollektor	2800 l	12 Personen	Prädiktiv
SOFC mit Solarkollek- tor	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC	6 m <sup>2</sup> Solar- kollektor	700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	SOFC	24 m <sup>2</sup> So- larkollektor	2800 l	12 Personen	Prädiktiv
PEFC mit Solarkollek- tor	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	PEFC	6 m <sup>2</sup> Solar- kollektor	700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH MFH; SIA- Ziel MFH; CH- Mittel	PEFC	24 m <sup>2</sup> So- larkollektor	2800 l	12 Personen	Prädiktiv
Alternatives Nutzerprofil	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC		700 l	2 Personen	Prädiktiv
	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC	6 m <sup>2</sup> Solar- kollektor	700 l	2 Personen	Prädiktiv
Zusätzliche Abgas- Wärmerück- gewinnung	EFH; PH	SOFC	WRG	700 l	4 Personen	Prädiktiv
	EFH; PH	SOFC	WRG+ Koll.	700 l	4 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH	SOFC	WRG	2800 l	12 Personen	Prädiktiv
	MFH; PH	SOFC	WRG+ Koll.	2800 l	12 Personen	Prädiktiv



Titel Konfiguration	Gebäude	System	System-Erweiterung	Speicher	Nutzerprofil	Regler
Hoher elektrischer Wirkungsgrad	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC $\eta$ erhöht		700 l	4 Personen	Prädiktiv
	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC $\eta$ erhöht	6 m <sup>2</sup> Solar- kollektor	700 l	4 Personen	Prädiktiv
PI- Regler	EFH; PH EFH; SIA- Ziel EFH; CH- Mittel	SOFC		700 l	4 Personen	PI
Speicher- grösse	EFH; SIA- Ziel	SOFC		300 l	4 Personen	Prädiktiv
	EFH; SIA- Ziel	SOFC		1000 l	4 Personen	Prädiktiv
	EFH; SIA- Ziel	SOFC		300 l	2 Personen	Prädiktiv
	EFH; SIA- Ziel	SOFC		1000 l	2 Personen	Prädiktiv

## 9 Resultate

Mit den in vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Randbedingungen und Fallunterscheidungen wurden TRNSYS [42] Simulationen durchgeführt. Die dabei erzielten Resultate werden im folgenden dargestellt.

In den Figuren mit dem Vergleich des Primärenergiebedarfs wird eine netto Überproduktion an lokal produziertem Strom (total ins Netz eingespeist minus total vom Netz bezogen) als negativer Primärenergiewert dargestellt. Die netto Überproduktion wird also verstanden als Anteil des Primärenergiebedarfes, der durch diese lokale Stromproduktion substituiert wird. Deshalb wird der Energiewert des in das Netz eingespeisten netto Überschusses multipliziert mit dem Primärenergiefaktor des angenommenen Strom-Mix (Kap. 5). Das gleiche gilt für die CO<sub>2</sub> Emissionen: Ein negativer Wert stellt den Wert an CO<sub>2</sub> Emissionen dar, der durch die lokale Stromüberproduktion eingespart werden kann.

### 9.1 Vergleich SOFC mit kondensierendem Gaskessel

#### Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie

Das SOFC System wurde bezüglich Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad für die EFH und MFH Gebäudetypen (Fig. 12) untersucht. Zum Vergleich werden die Resultate für die kondensierende Gastherme dargestellt. Negative Werte für den Primärenergiebedarf stellen den Überschuss-Wert des lokal erzeugten und ins Netz eingespeisten Stromes dar.

Falls nicht explizit angegeben beziehen sich die Resultate wie erwähnt auf den Strom-Mix „UCTPE“ und bei den EFH auf die 4-Personen-Belegung.

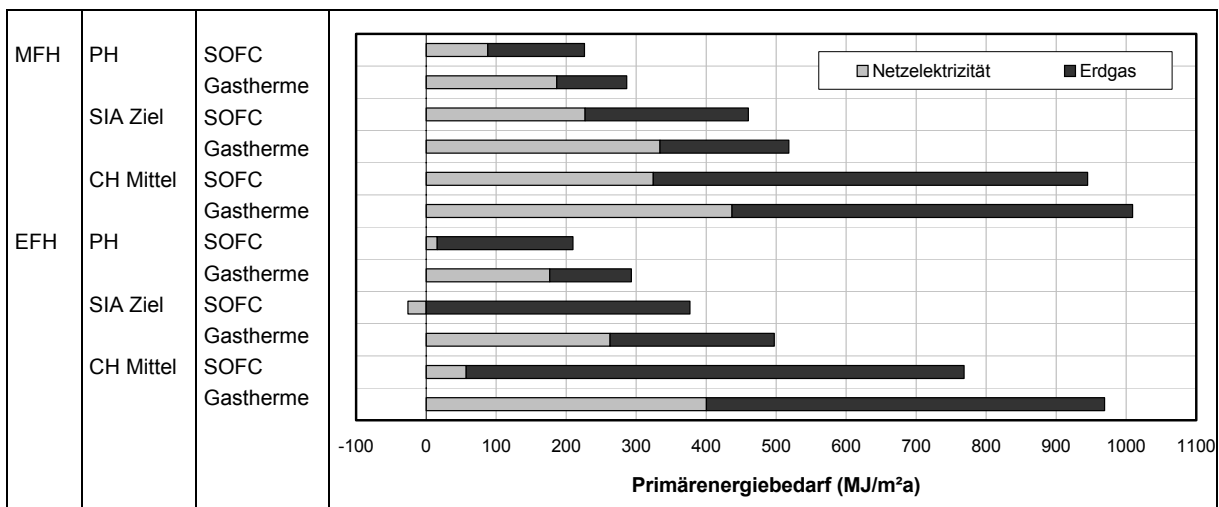


Fig. 12: Jährlicher nicht erneuerbar Primärenergiebedarf (MJ pro m<sup>2</sup> EBF) für EFH und MFH, ausgerüstet mit SOFC resp. kondensierender Gastherme

### Primärenergienutzungsgrad und Einfluss des Strom-Mix

Fig. 13 zeigt den Primärenergienutzungsgrad für die SOFC und die kondensierende Gastherme für die drei Typen von Strom-Mix. Der Primärenergienutzungsgrad ist in Kap. 5.2 definiert worden.

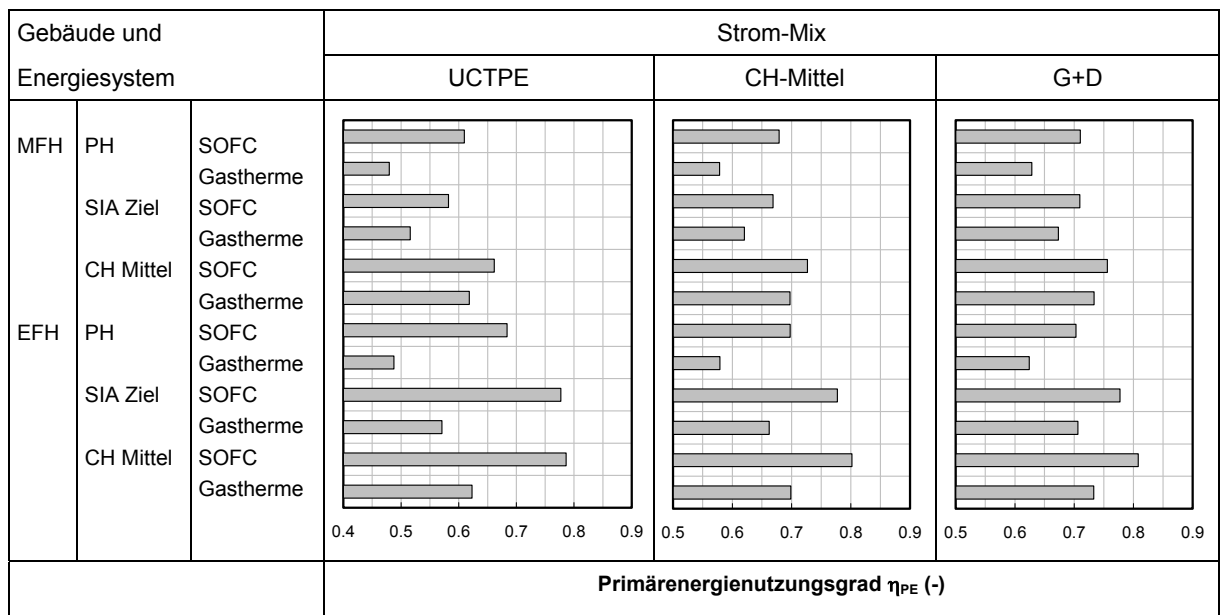


Fig. 13: Primärenergienutzungsgrad für EFH und MFH, ausgerüstet mit SOFC resp. kondensierender Gastherme, für drei Typen des Strom-Mix

### CO<sub>2</sub> - Emissionen

Aufgrund des Primärenergiebedarfes und den für die verschiedenen Strom-Mix-Szenarien entsprechenden Emissionsfaktoren (siehe auch Tab. 3), wurden die CO<sub>2</sub> - Emissionen berechnet (Fig. 14).

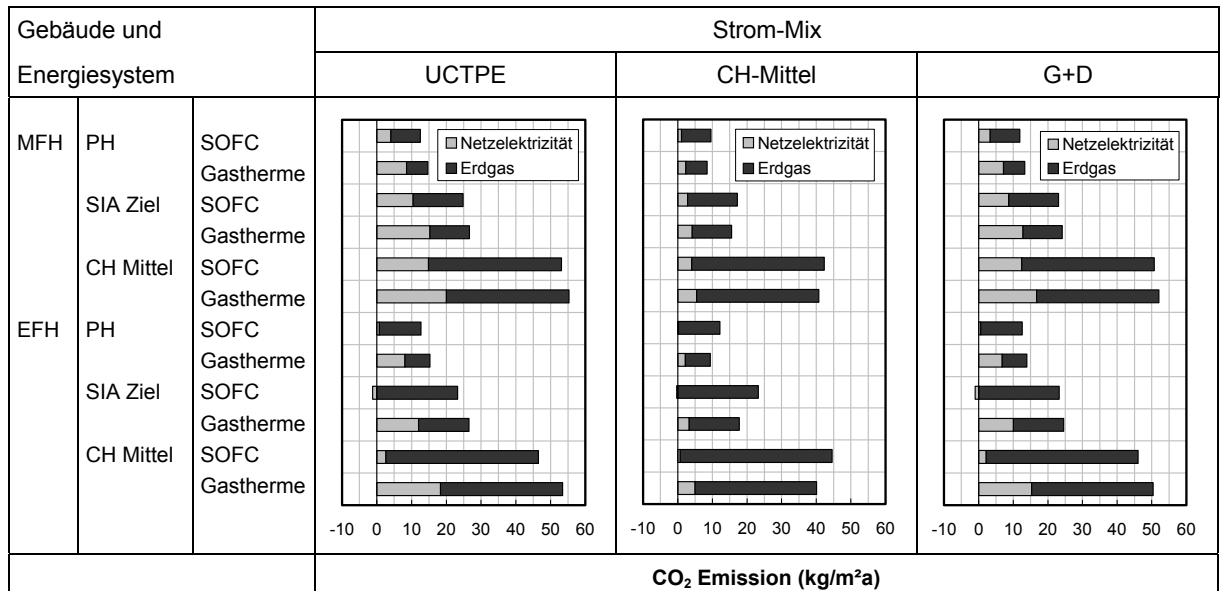


Fig. 14: Jährliche CO<sub>2</sub> - Emissionen pro EBF für EFH und MFH, ausgerüstet mit SOFC resp. kondensierender Gastherme, für drei Typen des Strom-Mix

## Teillastbetrieb und äquivalente Volllaststunden

Fig. 15 zeigt die Auftretensverteilung der Modulationsrate (Verhältnis nomineller zu aktuellem Erdgasbedarf) des SOFC Systems. Das System wurde wärmegeführt betrieben, d.h. die von der SOFC abgegebene Wärme wird möglichst vollständig im Gebäude genutzt. Es ist offensichtlich, dass bei den Gebäuden mit tiefem Heizwärmebedarf die Brennstoffzelle zu einem grösseren Anteil im Teillastbereich betrieben werden muss. Nur bei den MFH ist der Wärmebedarf für Warmwasser so gross, dass die SOFC auch in der Sommerperiode zu wesentlichen Teilen im Volllastbereich betrieben werden kann.

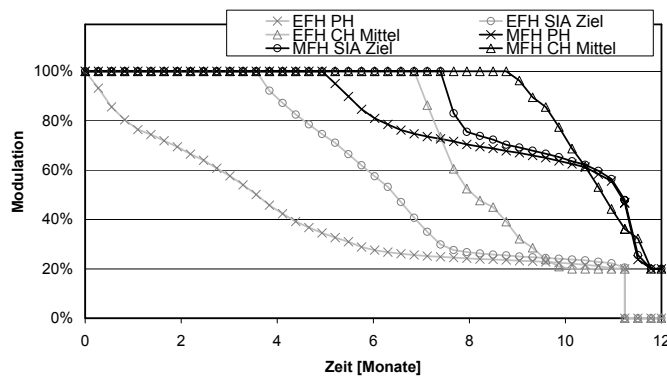


Fig. 15: Histogramm der Modulationsrate des SOFC Systems für eine Jahresperiode, für die verschiedenen Gebäudetypen

## Erkenntnisse (im Vergleich zur kondensierenden Gastherme):

- Mit dem Brennstoffzellengerät ergeben sich für alle Gebäudetypen ein niedrigerer Primärenergiebedarf und ein erhöhter Primärenergienutzungsgrad.
- Die relativ niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf und die höchsten Werte für den Primärenergienutzungsgrad werden in den Gebäuden erreicht, wo der jährliche Strombedarf möglichst gut mit dem total generierten Strom der BZ übereinstimmt.
- Die absolut niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf sind nicht von der BZ sondern vom Gebäude abhängig.
- Für alle berücksichtigten Typen von Strom-Mix ergibt sich für die Brennstoffzelle eine Reduktion des Primärenergiebedarfes.
- Für den Strom-Mix „CH-Mittel“ ergeben sich mit der Brennstoffzelle leicht erhöhte CO<sub>2</sub> – Emissionen, mit den anderen beiden Strom- Mix werden die Emissionen gesenkt.
- Für die Gebäudetypen mit niedrigem Heizwärmebedarf erreicht die SOFC im (berücksichtigten) wärmegeführten Betrieb sehr wenige Volllaststunden.

## 9.2 Kombination mit Solarkollektor

Für alle Gebäudetypen wurde die SOFC mit einem thermischen Solarsystem mit Solarkollektoren kombiniert. Die Resultate wurden mit einem System aus Gastherme und ebenfalls Solarkollektoren verglichen. Fig. 16 stellt die Resultate für den Primärenergiebedarf und den Primärenergienutzungsgrad dar (wiederum nur nicht erneuerbare Energien).

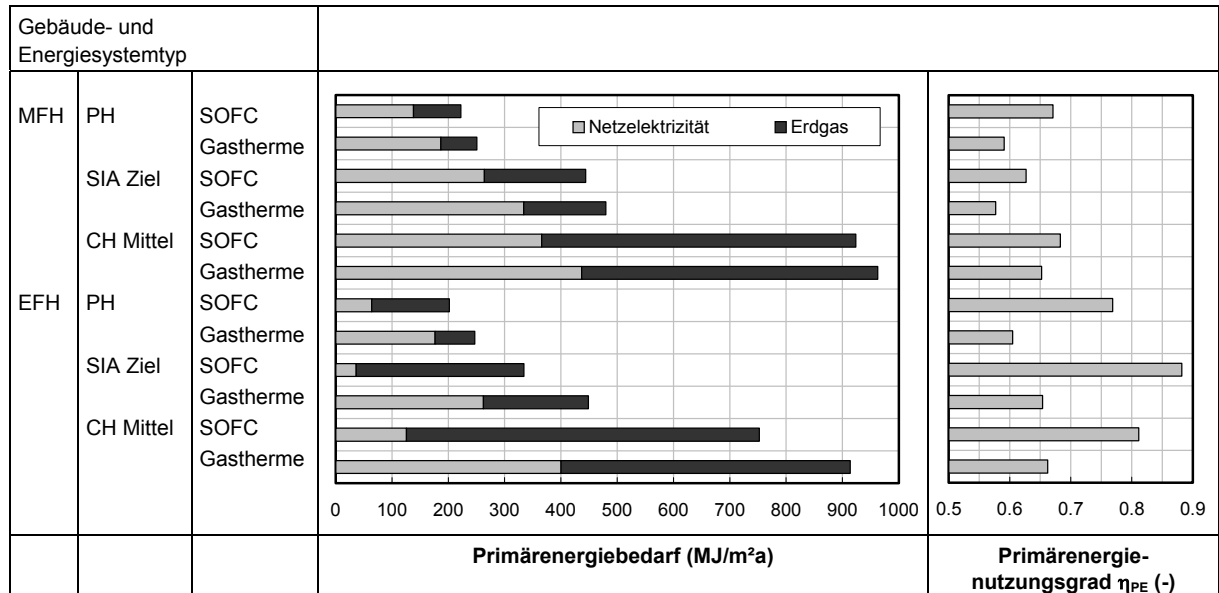


Fig. 16: Primärenergiebedarf und -nutzungsgrad für EFH und MFH, ausgerüstet mit einem kombinierten System SOFC – Solarkollektor resp. mit einem kombinierten System kondensierender Gastherme – Solarkollektor

Fig. 17 zeigt die Auftretensverteilung der Modulationsrate (Verhältnis nomineller zu aktuellem Ergasbedarf) des SOFC Systems, betrieben nach der Vorgabe, dass die von der SOFC abgegebene Wärme möglichst vollständig im Gebäude genutzt wird. Im Vergleich zum SOFC System ohne Solarkollektor wird die Anzahl Volllaststunden reduziert.

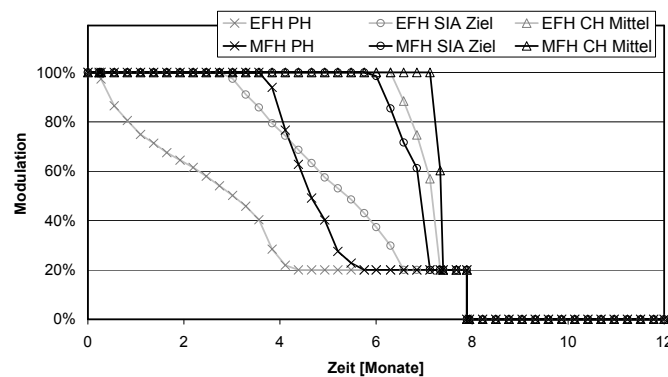


Fig. 17: Histogramm der Modulationsrate für eine Jahresperiode für die verschiedenen Gebäudetypen, ausgerüstet mit einem kombinierten SOFC – Solarkollektor System resp. mit einem kombinierten System kondensierender Gastherme – Solarkollektor

Tab. 10 zeigt die Anzahl der äquivalenten Volllastbetriebsstunden für die verschiedenen Gebäudetypen und die beiden berücksichtigten Profile für den Warmwasserbedarf, für das SOFC- System und das kombinierte System SOFC – Solarkollektor.

Tab. 10: Anzahl äquivalenter Volllastbetriebsstunden für das SOFC System und das System SOFC – Solarkollektor für die verschiedenen Gebäudetypen

Äquivalente Volllastbetriebsstunden (h)	Gebäudetyp		
	CH-Mittel	SIA Ziel	Passivhaus
SOFC			
EFH: 2 Personenprofil	5947	4901	3243
EFH: 4 Personenprofil	6285	5124	3426
MFH	7839	7458	7027
SOFC und Solarkollektor			
EFH: 2 Personenprofil	5172	3893	2470
EFH: 4 Personenprofil	5193	3967	2438
MFH	5441	5057	3770

In Fig. 18 sind die Resultate für das SOFC System nochmals zusammengefasst dargestellt:

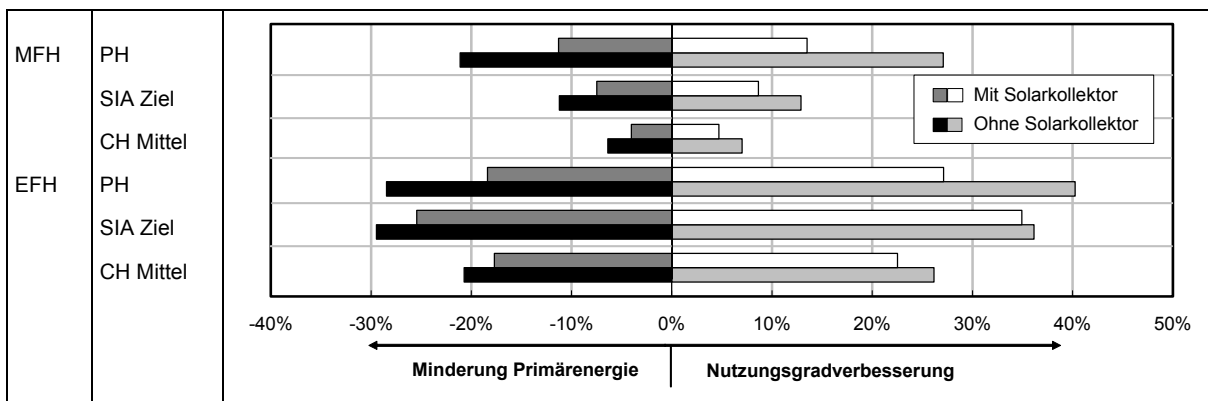


Fig. 18: Verhältnis des Primärenergiebedarf und -nutzungsgrad für EFH und MFH mit SOFC System, verglichen mit den Werten des kondensierenden Gasbrenners

## Erkenntnisse

- Für die EFH- Gebäudetypen mit niedrigem Heizwärmebedarf operiert die SOFC im (berücksichtigten) wärmegeführten Betrieb zu einem sehr grossen Prozentsatz der Zeit im Teillastbereich. Es resultieren sehr wenige Volllaststunden.
- Der Anteil des Primärenergiebedarfes für die Warmwasseraufbereitung ist mit rund 70 MJ/m<sup>2</sup>.a (für 4 Personen pro Wohnung) relativ klein. Somit kann auch mit einer thermischen Solaranlage relativ wenig an nicht erneuerbarer Primärenergie eingespart werden.
- Die Kombination der SOFC mit einem thermischen Solarsystem führt zu einem noch grösseren Überangebot an Wärme im Sommer, was wiederum generell zu noch tieferen Volllastbetriebsstunden für die SOFC führt. Beim PH operiert die SOFC auch beim MFH meist im Teillastbereich.
- Der Primärenergienutzungsgrad andererseits wird mit dem Solarkollektor für alle Gebäudetypen erhöht.

## 9.3 PEFC System

In Analogie zum SOFC System wurde auch ein PEFC- System ohne und mit thermischem Solarkollektor bezüglich Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad untersucht (Fig. 19). Resultate für kondensierende Gasthermen wurden wiederum für Vergleichzwecke mit aufgeführt.

Die Resultate können nicht direkt mit denjenigen für die SOFC verglichen werden, da der Leistungsbereich der spezifizierten PEFC höher ist als derjenige der SOFC. Da beim PEFC BZG Abschaltungen als eher zulässig angenommen wurden, resultierten auch mehr Abschaltzyklen. Vor allem bei den

Häusern mit kleinem Verbrauch wird die PEFC öfters ausgeschaltet. Die entsprechenden Auskühlungsverluste wurden aber nicht berücksichtigt.

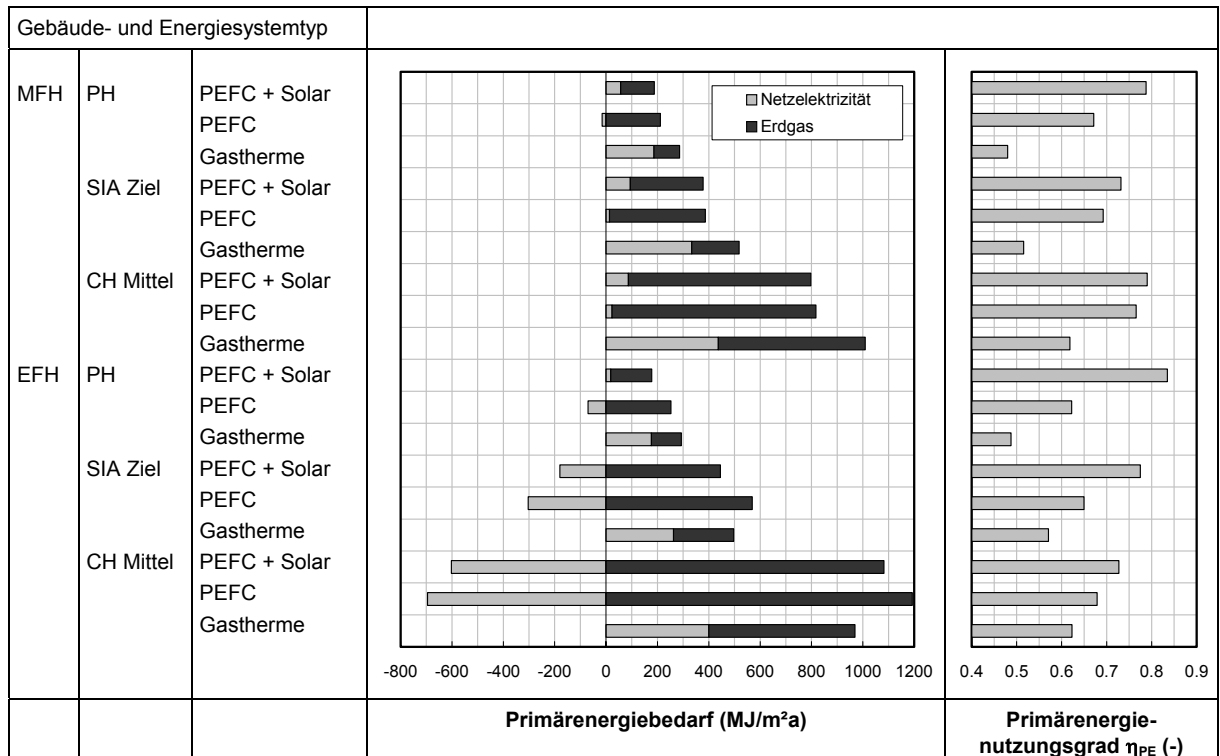


Fig. 19: Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad für EFH und MFH, ausgerüstet mit einem PEFC System, einem kombinierten PEFC – Solarkollektor System resp. mit einer kondensierenden Gastherme

## Erkenntnisse

- Für EFH Gebäudetypen mit grossem Wärmebedarf (SIA Ziel und insbesondere CH-Mittel) kann ein grosser Teil des Wärmebedarfes durch das PEFC-BZG gedeckt werden. Dadurch entsteht aber auch eine grosse Überdeckung an lokal produziertem Strom, der ins Netz eingespeist wird. Die Werte für den Primärenergiebedarf lassen sich deshalb nicht direkt mit denjenigen dem SOFC-BZG vergleichen.

## 9.4 Einfluss der Abgaswärmerückgewinnung

Für den PH Gebäudetyp (mit mechanischer Lüftung) wurde der Einfluss einer Wärmerückgewinnung SOFC Abgas – Zuluft Lüftung) untersucht. (Fig. 20).

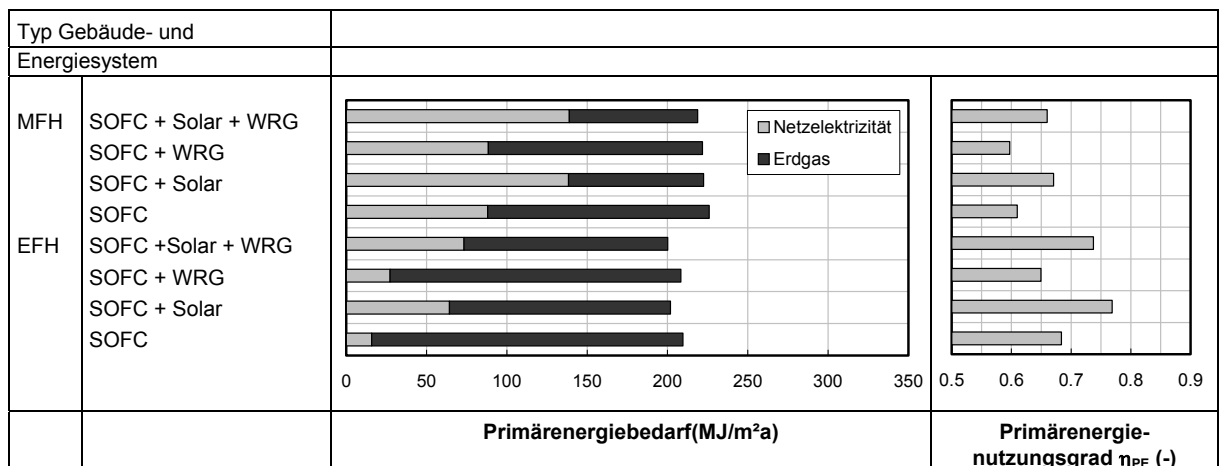


Fig. 20: Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad für EFH und MFH, ausgerüstet mit einem SOFC System, und mit WRG SOFC- Abgas/Zuluft Lüftung

## Erkenntnisse

- Mit der Wärmerückgewinnung resultiert praktisch keine Reduktion des Primärenergiebedarfes. Der Primärenergienutzungsgrad verschlechtert sich merklich. Weil durch die WRG der Bedarf an Heizwärme sinkt, produziert die SOFC weniger Wärme und somit weniger Strom. Damit erhöht sich der Bezug von Strom aus dem Netz, was beinahe zu Egalisierung des Primärenergiebedarfes führt.

### 9.5 Einfluss des elektrischen Wirkungsgrades der SOFC

Der Einfluss des elektrischen Wirkungsgrades der SOFC auf den Primärenergiebedarf und – Nutzungsgrad wurde wiederum für die drei Gebäudetypen bestimmt (Fig. 21). Zu Grunde gelegt wurden die beiden in Fig. 9 dargestellten Charakteristiken der SOFC (normaler und erhöhter elektrischer Wirkungsgrad). Das kombinierte System mit Solarkollektor wurde ebenfalls mit untersucht.

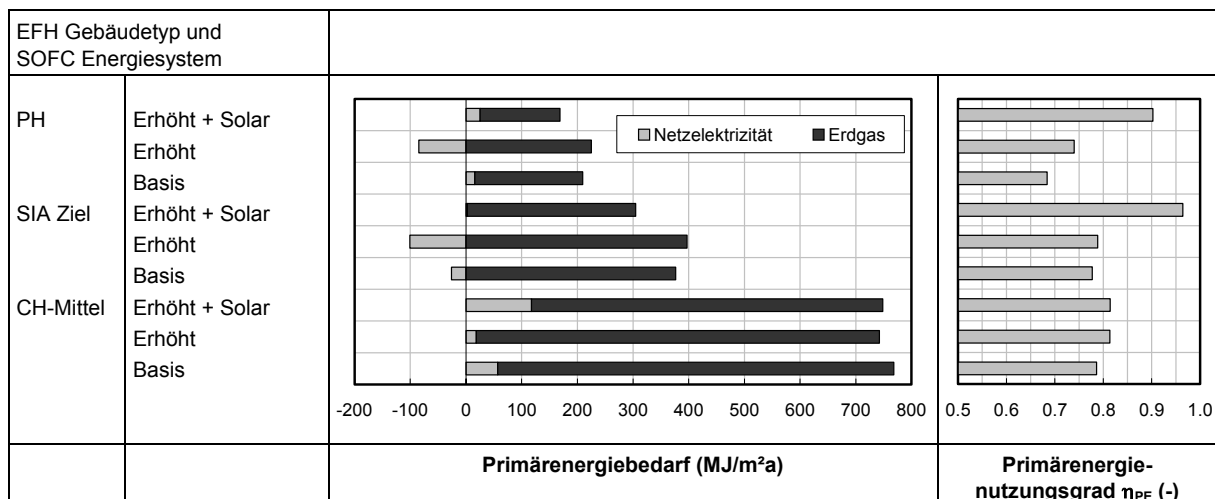


Fig. 21: Jährlicher Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad für die drei EFH Gebäudetypen, für SOFC Basis und SOFC mit erhöhtem Wirkungsgrad, ohne und in Kombination mit Solarkollektor

## Erkenntnisse

- Der Gesamtwirkungsgrad der BZ (zusammengesetzt aus thermischem und elektrischem Wirkungsgrad) wurde nicht verändert. Durch die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades der SOFC wird wegen dem gleich bleibenden Wärmebedarf pro Gebäude allerdings mehr Elektrizität produziert, d.h. die BZ war für den gleichen Wärmebedarf länger oder mit einer höheren Modulation im Betrieb und hat dadurch mehr Erdgas verbraucht. Dort wo die zusätzlich produzierte Elektrizität im Gebäude eingesetzt wird, ergibt sich eine Reduktion der Primärenergie, da weniger Elektrizität vom Netz kommt. Wenn hingegen die zusätzlich erzeugte Elektrizität ins Netz zurück gespiesen wird, kann der Primärenergiebedarf nicht mehr direkt verglichen werden. Die in Fig. 21 negativen Werte, entsprechen der Primärenergie, welche im Netz substituiert werden kann.
- Beim Primärenergienutzungsgrad kann dank dem höheren elektrischen Wirkungsgrad der BZ in allen Fällen eine leichte Verbesserung festgestellt werden.
- Die Kombination von der BZ mit erhöhtem Wirkungsgrad und Solarkollektoren zeigt einen höheren Primärenergiebedarf als der Fall, wo die BZ ohne Solarkollektoren betrieben wird. Dieser Effekt beruht auf den abgeschalteten BZ im Sommer. Während dieser Zeit muss die Elektrizität mit einem hohen Primärfaktor bezogen werden.

### 9.6 Grösse des Speichers

Es wurde angenommen, dass die Grösse des Speichers einen grossen Einfluss darauf hat, wie viel Wärme-Output von der Brennstoffzelle zu nutzbarer Wärme transformiert werden kann. Dies besonders im Falle der SOFC, wo ein on/off Betrieb nicht sehr vorteilhaft ist.

Typische Verläufe der Wassertemperatur zuoberst im geschichteten Schichtspeicher sind für eine Periode von wenigen Wochen anfangs Sommer dargestellt (Fig. 22).



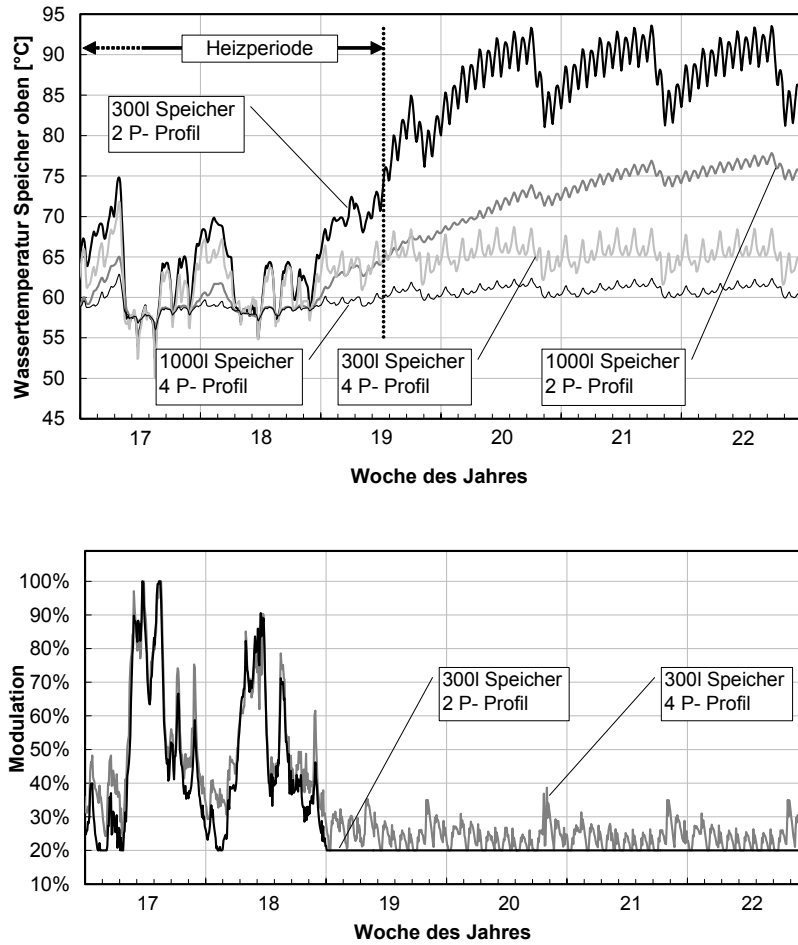


Fig. 22: Typische Verläufe der Wassertemperatur zuoberst im Schichtspeicher für eine Periode von wenigen Wochen anfangs Sommer, für zwei verschiedene Warmwasserbedarfsprofile und für zwei Speichergössen (oben). Die untere Grafik zeigt den Verlauf der Modulation der SOFC für zwei verschiedene Warmwasserbedarfsprofile. Gebäudety: EFH SIA Ziel

Für das 2 Personen- Profil ist eine deutlich höhere Temperatur des Speichers feststellbar. In Fig. 22 unten sieht man, dass die Modulation im Sommerbetrieb durchgehend auf das Minimum eingestellt ist. Die Nominal-Leistung der Brennstoffzelle ist offensichtlich zu gross für diese Konfiguration.

Bedarfsprofil BWW Speichergösse			
2 Personen - Profil	300 l		
	700 l		
	1000 l		
4 Person - Profil	300 l		
	700 l		
	1000 l		

Fig. 23: Einfluss der Speichergösse auf den Primärenergiebedarf für den Gebäudety "SIA Ziel", in Abhängigkeit des Profils für den Warmwasserbedarf

Der Einfluss der Speichergrosse auf den Primärenergiebedarf und den Primärenergienutzungsgrad ist in der Fig. 23 für den Gebäudetyp „EFH SIA Ziel“ wiedergegeben, und zwar für drei verschiedene Speichergrossen und die beiden Bedarfsprofile für Warmwasser.

### Erkenntnisse

- Die Grösse des Wasserspeichers hat letztlich keinen grossen Einfluss auf den Primärenergiebedarf. Eine bessere Betriebsweise der BZ bei grossen Speichern wird durch die grösseren Speicherverluste mehr als ausgeglichen. Interessanterweise ergeben sich der kleinste Primärenergiebedarf und der grösste Primärenergienutzungsgrad für den kleinsten Speicher (300l). Dies erklärt sich damit, dass für alle Speichergrossen die gleiche Isolationsdicke verwendet wurde, dass die prädiktive Regelung für kleinere Speicher vorteilhafter und dass die Bereitstellung von Zusatzwärme mit der Gastherme primärenergetisch gut ist.

## 9.7 Einfluss der Regelung

Eine prädiktive Regelung ist vor allem wichtig beim Einsatz der Brennstoffzelle im EFH, wo die Bedarfsschwankungen und die Zeiten mit Nichtbelegung gross sind, und wo demzufolge auch eine Situation entstehen kann, wo die Wärme aus dem Betrieb der SOFC nicht mehr gespeichert werden kann.

In Fig. 24 ist der Primärenergiebedarf dargestellt für die verschiedenen Gebäudetypen, ausgerüstet mit SOFC, und zwar für den Fall mit einer emulierten prädiktiven Regelung und für den Fall mit PI-Regler.

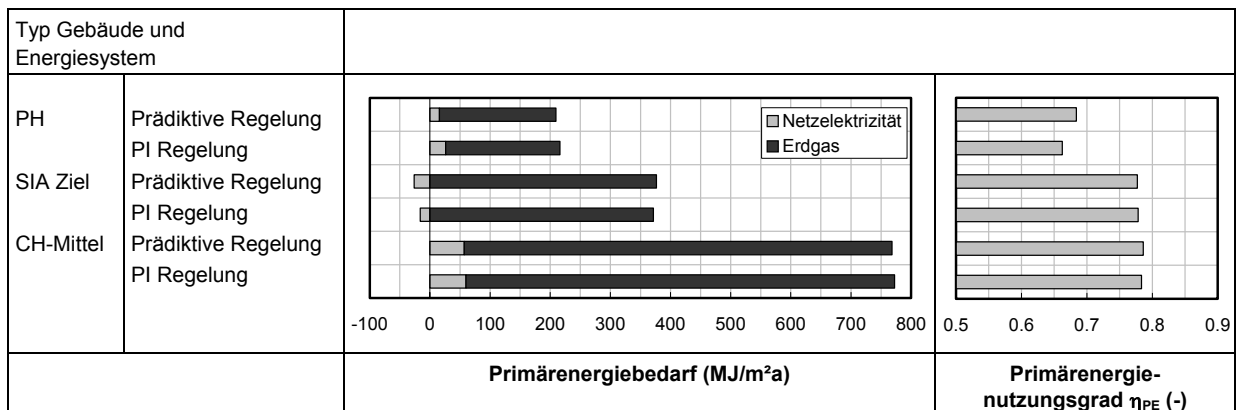


Fig. 24: Jährlicher Primärenergiebedarf und –nutzungsgrad für die drei EFH Gebäudetypen, für SOFC mit prädikativer Regelung, respektive mit PI Regler.

### Erkenntnisse

- Je kleiner der nominelle Energieverbrauch in Gebäuden ist, desto besser wirkt der prädiktive Regler. Eine Verbesserung kann vor allem im Bereich der Modulation von 20- 60% erwartet werden. Je grösser der nominelle Verbrauch wird, desto höher wird die Zeit pro Jahr, in der die BZ sowie mit 100% Leistung betrieben wird, unabhängig vom Reglertyp.

## 10 Zusammenfassung Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Aus den Resultaten lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen und Schlussfolgerungen ziehen, immer in Bezug auf das System mit der kondensierenden Gastherme (resp. Gastherme + Solarkollektor):

### 10.1 Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie

- Mit dem Brennstoffzellengerät ergeben sich für alle Gebäudetypen ein niedrigerer Primärenergiebedarf und ein erhöhter Primärenergienutzungsgrad.
- Die relativ niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf und die höchsten Werte für den Primärenergienutzungsgrad werden dort erreicht, wo der jährliche Strombedarf möglichst gut mit dem total generierten Strom des BZG übereinstimmt.
- Die absolut niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf sind nicht von der BZ sondern vom Gebäude abhängig.
- Für alle berücksichtigten Typen von Strom-Mix ergibt sich durch den Einsatz der Brennstoffzelle eine Reduktion des Primärenergiebedarfes.
- Der Anteil des Primärenergiebedarfs für die Warmwasseraufbereitung ist mit rund  $70 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$  (für 4 Personen pro Wohnung) relativ klein. Somit kann auch mit einer thermischen Solaranlage relativ wenig an nicht erneuerbarer Primärenergie eingespart werden. Andererseits wird der Primärenergienutzungsgrad mit dem Solarkollektor für alle Gebäudetypen erhöht.
- Wird vereinfacht angenommen, dass die nicht erneuerbare Primärenergie für die Netzelektrizität in Fig. 12 und Fig. 16 zu 50% fossiler Herkunft ist, können die so berechneten Werte mit dem Zielwert der 2000-Watt-Gesellschaft für die fossile Energie für das Jahr 2050 ( $253 \text{ MJ/m}^2 \text{EBFa}$ ) verglichen werden. Dabei wird ersichtlich, dass der Gebäudetyp „PH“ sowohl für das EFH als auch für das MFH diesen Wert unterschreitet. Ein EFH mit dem Gebäudetyp „SIA Ziel“ mit BZG und Solarkollektor verfehlt den Zielwert von  $253 \text{ MJ/m}^2 \text{EBFa}$  nur knapp.
- Das langfristige Ziel für das Jahr 2150 bis 2200 bezüglich der fossilen Primärenergie ( $63 \text{ MJ/m}^2 \text{EBFa}$ ) könnte mit der Variante „PH“ mit BZG und Solarkollektor durch den Einsatz eines erneuerbaren Brennstoffes (z.B. Biogas oder solar erzeugter Wasserstoff) erreicht werden.

### 10.2 CO<sub>2</sub> - Emissionen

- Für den Strom-Mix „Schweiz inkl. Import“ (mit hohen Anteilen an Wasser- und Atomstrom) ergibt der Einsatz von BZ leicht höhere CO<sub>2</sub> – Emissionen, für den Strom-Mix „Europa UCTPE“ und auch für den Strom- Mix „G+D Kraftwerk“ ergeben sich für die BZ tiefere Emissionswerte.

### 10.3 Auslegung und Betrieb FC

- Das Brennstoffzellengerät soll so dimensioniert werden, dass der Strombedarf möglichst vollständig mit dem BZG gedeckt werden kann (bei Deckung des Restwärmebedarfes mit der kondensierenden Gastherme).
- Für die Gebäudetypen mit niedrigem Heizwärmebedarf erreicht das hier definierte SOFC System im (berücksichtigten) wärmegeführten Betrieb sehr wenige Volllaststunden. Für Niedrigenergie EFH hat das hier definierte SOFC also eine zu grosse Leistung. Die angenommene PEFC System ist noch stärker überdimensioniert.
- Die Kombination mit einem Solarkollektor reduziert den Primärenergiebedarf nur unwesentlich, führt aber zu einer deutlichen Reduktion der Volllaststunden für das Brennstoffzellengerät. Falls die BZ einen noch höheren Wirkungsgrad hat, wird der Primärenergiebedarf mit Solarkollektor sogar höher als ohne Solarkollektor.
- Die Kombination mit einem thermischen Solarsystem führt zu einem noch grösseren Überangebot an Wärme im Sommer, damit besteht auch eher die Gefahr des Überhitzens des Speichers im Sommer.
- Die Grösse des Wasserspeichers hat keinen grossen Einfluss auf den Primärenergiebedarf. Eine bessere Ausnutzung wird durch grössere Speicherverluste mehr als ausgeglichen. Interessanterweise ist der kleinste Primärenergiebedarf und der grösste Primärenergienutzungsgrad beim kleinsten Speicher (300l) gegeben.
- Mit der Wärmerückgewinnung resultiert praktisch keine Reduktion des Primärenergiebedarfes. Der Primärenergienutzungsgrad verschlechtert sich merklich. Weil durch die WRG der Bedarf an

Heizwärme sinkt, produziert die SOFC weniger Wärme und somit weniger Strom. Damit erhöht sich der Bezug von Strom aus dem Netz (mit hohem Primärenergiefaktor), was beinahe zu Egalisierung des Primärenergiebedarfes führt.

- Bei einer Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades der SOFC wird wegen dem gleich bleibenden Wärmebedarf pro Gebäude mehr Elektrizität produziert, d.h. die BZ ist für den gleichen Wärmebedarf länger oder mit einer höheren Modulation im Betrieb und hat dadurch mehr Erdgas verbraucht. Dort wo die zusätzlich produzierte Elektrizität im Gebäude eingesetzt wird, ergibt sich eine Reduktion der Primärenergie, da weniger Elektrizität vom Netz kommt. Wenn hingegen die zusätzlich erzeugte Elektrizität ins Netz zurück gespeist wird, kann der Primärenergiebedarf nicht mehr direkt verglichen werden.
- Beim Primärenergienutzungsgrad kann bei einem höheren elektrischen Wirkungsgrad der BZ in allen Fällen eine leichte Verbesserung festgestellt werden.
- Für EFH Gebäudetypen mit grossem Wärmebedarf (SIA Ziel und insbesondere CH-Mittel) kann ein grosser Teil des Wärmebedarfes durch das angenommene PEFC System gedeckt werden. Dadurch entsteht aber auch eine grosse Überdeckung an lokal produziertem Strom, der ins Netz eingespeist wird. Die Werte für den Primärenergiebedarf lassen sich deshalb nicht direkt mit denjenigen des SOFC Systems vergleichen.
- Der Einfluss der Regelung ist nicht gross. Je kleiner der nominelle Energieverbrauch in Gebäuden ist, desto besser wirkt der prädiktive Regler. Eine Verbesserung kann vor allem im Bereich der Modulation von 20- 60% erwartet werden. Je grösser aber der durchschnittliche nominelle Verbrauch wird, desto höher wird die Zeit pro Jahr, in der die BZ sowieso mit 100% Leistung betrieben wird, unabhängig vom Reglertyp.

#### **10.4 Ausblick**

In diesem Vorprojekt wurden nur dezentrale Systeme untersucht. Es gibt einige Gründe, die für ein lokales Netz mit zentralem oder auch dezentralem Speicher sprechen. So könnte man sich beispielsweise vorstellen, mit einem zentralen Saisonspeicher die erzielten Überschüsse zu speichern. Überhaupt könnte sich die saisonale Speicherung zusammen mit der BZ als eine viel versprechende Kombination erweisen.

Bei den Regelungsstrategien ist nicht nur die wärmegeführte sondern auch die stromgeführte Regelung zu prüfen. Es könnten aber auch Kriterien wie Gesamtkostenoptimierung oder kleinster Verbrauch von Primärenergie [39] in die Regelung einfließen.

Die zusätzliche Verwendung von Photovoltaik könnte den Primärenergieverbrauch erheblich beeinflussen. Vor allem im Sommer, wo wegen der Solarkollektoren kein Strom mehr erzeugt wird, könnte sich ein positiver Einfluss bemerkbar machen.

In dieser Arbeit wurde die graue Energie vernachlässigt. Um aber ein besseres Bild zu erhalten, müsste diese berücksichtigt werden.

Diese und weitere Aspekte werden im internationalen IEA Projekt Annex 42 „The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems (FC+COGEN-SIM)“ [55] aufgegriffen. Dieses Projekt wird von 2004 bis 2007 durchgeführt, und ist unterteilt in drei Subtask:

- A) Beschreibung von Cogeneration Systemen, von Bedarfsprofilen für Strom und Brauchwarmwasser, Definition von Fällen und Konfigurationen für die Evaluation in Subtask C.
- B) Modellentwicklungen für Brennstoffzellen- und andere BHKW Systeme, Entwicklung von Regelalgorithmen, Integration der Modelle in verschiedene bestehende Gebäude- und Anlagensimulationsprogramme, Vergleiche zwischen Modellen und mit Messungen.
- C) Technische, ökologische (und ökonomische) Optimierungen und Evaluation von Brennstoffzellen- und anderen Mikro-BHKW Systemen. Vergleich mit anderen Technologien, unter Einbezug erneuerbarer Energien, Definition von optimalen Konfigurationen und Anwendungsgebieten, Evaluation von bestehenden Anlagen, Erstellen von Planungshinweisen.

## 11 Referenzen und Literatur

### 11.1 Referenzen

- [1] Watson R.T. et al. Climate Change 2001: Synthesis Report. Stand-alone edition. IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 184. 2001
- [2] IPCC Second Assessment. Climate Change 1995
- [3] IPCC Third Assessment Report. Climate Change 2001. Mitigation (WG III)
- [4] Nakicenovic N., et al. IPCC Special Report, Emissions Scenarios, Summary for Policymakers, 2000
- [5] Kesselring P., Winter C.-J. World Energy Scenarios: A Two-Kilowatt Society Plausible Future or Illusion? Energietage 1994, PSI Villigen. 1994
- [6] Goldemberg J. et al. Energy for a Sustainable World. Wiley eastern limited. New Delhi. 1988
- [7] Suarez, C.E. Energy Needs for Sustainable Human Development, Energy as an Instrument for Socio-Economic Development. UNDP. New York. 1995
- [8] ETH-Rat. "2000 Watt-Gesellschaft – Modell Schweiz, Strategie Nachhaltigkeit im ETH-Bereich", 1998, siehe auch [www.novatlantis.ch](http://www.novatlantis.ch)
- [9] Spreng D. et al. Das Energieverbrauchsfenster, das kein Fenster ist. CEPE. 2002
- [10] Nakicenovic N., Grübler A. McDonald A., Global Energy Perspectives, IIASA/WEC, Cambridge University Press, 0-521-64569-7, 1998
- [11] Koschenz M., Pfeiffer A. Energie- und Gebäudetechnik für die 2000-Watt-Gesellschaft – Modell Schweiz. Novatantis Bericht. EMPA Dübendorf. 2004
- [12] Micro-Map. Mini and micro CHP market. Assessment and development plan. Summary report. A Study supported by the European Commission SAVE programme, DGTREN. FaberMaunsell Ltd. London. 2002
- [13] Bühring A., Heinzl A., Luther J., Fritz H.L. Energieversorgung im Niedrigstenergiebau: Von der Abluftwärmepumpe mit Solarkopplung zum Brennstoffzellen-Heizgerät. FVS Themen 2001.
- [14] EU White Paper for a Community Strategy and Action Plan on Renewable Sources of Energy. 1997
- [15] Action Plan to Improve Energy Efficiency in the European Community. COM (2000) 247
- [16] EU Directive: "Promotion of electricity from renewable energy sources in the internal electricity market". COM (2000) 884
- [17] EU Sixth Environment Action Programme "Environment 2010: Our future, our choice. COM (2001) 31
- [18] EU Directive: Energy Performance of Buildings. COM (2001) 226
- [19] European Climate Change Programme ECCP (2001)
- [20] EU Directive: On the promotion of the use of biofuels for transport. COM (2001) 547
- [21] EU Directive: On the promotion of cogeneration based on useful heat demand in the internal energy market. COM (2002) 415
- [22] Jahresbericht 2000 zum Forschungsprogramm Umgebungswärme, WKK, Abwärme. BFE 2000
- [23] <http://www.energie.ch/themen/haustechnik/blockheizkraftwerke/2index.html>
- [24] 5<sup>th</sup> European SOFC Forum. Lucerne. July 2002
- [25] Proceedings of Fuel Cell Home and 1<sup>st</sup> European PEFC Forum, Lucerne. July 2001
- [26] Biogas - Brennstoffzellensysteme, Symposium über den Stand der Entwicklung und die Perspektiven, Steyr. Mai 2001
- [27] Van Herle J., Membrez Y., Favrat D. Energy balance model for a SOFC cogenerator operated with biogas. Symposium on Fuel Cells Science and Technology, Amsterdam. Sept. 2002

- [28] EU-Projekt im 5. Rahmenprogramm „Virtual fuel cell power plant“. Vaillant GmbH, Remscheid, siehe auch [www.cogen.org/projects/vfcpp.htm](http://www.cogen.org/projects/vfcpp.htm)
- [29] EU Projekt „Negev“ Neue Gesamtenergieversorgungskonzepte für Gebäude. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme.
- [30] EU Projekt „DISPOWER: Integration of Renewable Energies into Existing and Future Supply Structures“, siehe [www.dispower.de](http://www.dispower.de)
- [31] Bünger U. Macht die kleine Brennstoffzelle zur Hausenergieversorgung auch im Passivhaus Sinn? Tagungsband Passivhaustagung 2001, Böblingen. 2001
- [32] Vetter M., Sitré B. Sind Mini-KWK-Anlagen für das Passivhaus geeignet? Anforderungen und Potentiale. Passivhaus-Tagung Hamburg. Feb. 2003
- [33] Entress J. Energiewirtschaftliche Bewertung integrierter Nahwärmesysteme auf der Basis von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung, Dissertation Uni Tübingen. 1997
- [34] Pehnt M. Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. VDI Fortschrittsberichte Reihe 6, Nr. 476. 2002
- [35] Projekt „Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale Stationäre Brennstoffzellen“ Deutschland, siehe [www.bhkw-info.de/brennstoffzellen/bz-oeko.html](http://www.bhkw-info.de/brennstoffzellen/bz-oeko.html)
- [36] Bokämper S. Marktperspektiven von Brennstoffzellen-Heizgeräten – Eine ökonomische Systemanalyse. Beiträge zur Energiesystemforschung Nr. 2 Dissertation Berlin. 2002.
- [37] Krammer Thomas. Brennstoffzellenanlagen in der Hausenergieversorgung : Instrumentarien zur Potenzialanalyse. München : Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München. 2001. (IfE Schriftenreihe ; Heft 44)
- [38] Hube W., Wittwer C. Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten mit Hilfe der Simulationsumgebung ColSim und deren Validierung im Feldtest«, 10. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI- Technologie- Kolleg. 2000
- [39] Sitré B. (2003). Development of a model for small-scale SOFC cogeneration plants for heat and power supply in residential buildings. TRNSYS User Tag, Stuttgart. März 2003
- [40] Vetter M., Wittwer C. Model-based development of control strategies for domestic fuel cell cogeneration plants. Proc. France-Deutschland Fuel Cell Conference 2002, Saarbrücken, p. 77-84
- [41] Beausoleil-Morrison I., Cuthbert D., Deuchars G., and McAlary G.. The Simulation of Fuel Cell Cogeneration Systems within Residential Buildings. Proc. eSim 2002, 40-47, The Canadian Conference on Building Energy Simulation, Montréal Canada. 2002
- [42] TRNSYS 15, Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin Madison, USA. 2000
- [43] M. Burer, K. Tanaka, D. Favrat and K. Yamada. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers, Energy Vol. 28. Issue 6. p 497-518. May 2003
- [44] UCPTE Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité (UCPTE), Luxembourg. Jahresberichte, UCPTE-Sekretariat, Wien
- [45] Real M., Nipkow J., Tanner L., et al. Simulation Warmwassersysteme – Schlussbericht. BFE.1999
- [46] Frischknecht R. et al. Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, ETH Zürich, PSI Villigen. 3.Auflage, ENET. Bern 1996
- [47] Tagungsdokumentation "Entwicklungstendenzen der Wärmekraftkopplung: Brennstoffzellen und Blockheizkraftwerke", November 2002, Zürich, Schweizerischer Fachverband für Wärmekraftkopplung
- [48] Meteonorm 4.0
- [49] Passivhaus Institut. Passivhaus Standard und Passivhaus Projektierungs- Paket. Darmstadt, Deutschland. 1999

- [50] TopTest GmbH, [www.topten.ch](http://www.topten.ch), Ratgeber Waschmaschinen, Zürich. 2003
- [51] Erdmann G., Kostenfragen bei der Markteinführung von stationären Brennstoffzellen, TU Berlin
- [52] Jochem E. et al. Steps towards a 2000 Watt-Society. Developing a white paper on research & development of energy-efficient technologies. Novatlantis Vorstudie. Dez. 2002
- [53] SIA 380/1, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich. Ausgabe 1988
- [54] SIA 380/1, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich. Ausgabe 2001
- [55] Web site IEA Annex 42 „FC+COGEN-SIM“: <http://cogen-sim.net/>

## **11.2 Weiterführende Literatur**

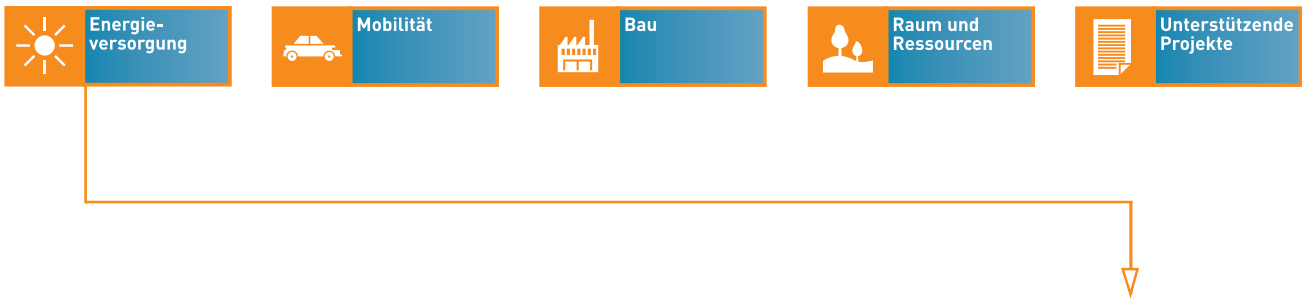
- [56] Diethelm R, Raak H, Hardegger P. The residential Sulzer Hexis SOFC micro-cogenerator. Fuel Cell Home 2001, European Fuel Cell Forum, Luzern. 2001.
- [57] Winkler W. Brennstoffzellenanlagen. Berlin: Springer ; 2002.
- [58] S. Minett. The Environmental Aspects of Cogeneration in Europe. Power Plants '01. Oct 2001.
- [59] Zogg, M. Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll? Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)12, 959/966
- [60] Solare Saisonspeicherung im oberflächennahen Erdreich. Einsatzmöglichkeiten für Wohnbauten in der Schweiz. BFE, ZHW, EPFL. 1999
- [61] Gantner U., Jakob M. Hirschberg S. Projekt GaBE: Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen; Perspektiven der zukünftigen Strom- und Wärmeversorgung für die Schweiz: ökologische und ökonomische Betrachtungen. PSI-Bericht-01-12
- [62] Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz? Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, BUWAL. 2000
- [63] Henrik K., R. "Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable development, and to each other?" Journal of Cleaner Production, 8, pp. 243-254. 2000
- [64] Lovins, L., H., Weizsäcker, E. v., Lovins, A., B. "Factor Four, Doubling Wealth, Halving Resource Use, The new report to the Club of Rome" Earthscan. 1997
- [65] International Energy Agency. "Energy Balances of OECD Countries". 2000







# Die novatlantis-Projektcluster im Überblick.



## Hausenergieversorgung

Der Einsatz von kleinen dezentralen Brennstoffzellengeräten stellt eine Möglichkeit der Gebäudetechnik für nachhaltige Gebäude im Sinne der 2000 Watt Gesellschaft dar, vor allem bei der Verwendung von erneuerbaren gasförmigen Energieträgern wie beispielsweise Biogas. Die Vorstudie untersucht, welche Rolle Brennstoffzellengeräte in der lokalen Energieversorgung von Wohngebäuden in Zukunft spielen werden, und gibt Hinweise für optimale Konzepte und Anwendungsbereiche.

Mit den untersuchten erdgasbetriebenen Brennstoffzellengeräten ergeben sich - im Vergleich zu kondensierenden Gasthermen und Strom ab Netz - für alle Gebäudetypen ein niedrigerer Primärenergiebedarf und ein erhöhter Primärenergienutzungsgrad. Die niedrigsten Werte für den Primärenergiebedarf und die höchsten Werte für den Primärenergienutzungsgrad werden dort erreicht, wo in der Jahressumme der Elektrizitätsbedarf des Gebäudes möglichst gut mit der total generierten elektrischen Energie des Brennstoffzellengerätes übereinstimmt. Das Brennstoffzellengerät (BZG) soll so dimensioniert werden, dass der Strombedarf des Gebäudes im Jahresmittel möglichst vollständig mit dem BZG gedeckt werden kann (bei Deckung des Restwärmebedarfes mit der kondensierenden Gastherme).

Die hier begonnen Arbeiten werden im internationalen IEA Projekt Annex 42 „The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems“ weitergeführt.

