

# **Brennstoffzellen**

Einsetzbarkeit in der dezentralen  
Energieversorgung, mit speziellem Bezug  
auf das Steirische Vulkanland

Fachbereichsarbeit aus Chemie

Vorgelegt bei MMag<sup>a</sup> Veronika Uller

Von Fabian Weißenbacher, 8Cn

Feldbach, 13.04.2010

## Vorwort

Ausschlaggeber für die Erstellung der vorliegenden Arbeit war ein großes Interesse an der Brennstoffzellentechnologie und ihres Potentials, sowie der Wunsch, schon im Vorfeld eines späteren Studiums Bekanntschaft mit der Praxis des wissenschaftlichen Arbeitens zu machen.

Den Bezug auf das Steirische Vulkanland habe ich dabei nicht nur aus persönlicher Verbundenheit gewählt, sondern auch, weil es innerhalb der Region ein starkes Bekenntnis zu erneuerbaren Energien gibt und zudem weitgehende Energieautarkie angestrebt wird. Von der anfänglichen Idee, sich mit der Machbarkeit mobiler Brennstoffzellensysteme zu beschäftigen, distanzierte ich mich jedoch im Laufe der Recherchen immer weiter, bis schließlich die Entscheidung fiel, stationäre Anwendungen in den Mittelpunkt der Betrachtung zu stellen.

Rückblickend betrachtet stellte sich die im Rahmen der Arbeit nötige Quellensuche und Textproduktion als sehr umfangreich heraus, auch weil viele Daten unter erheblichen Aufwand aus verschiedensten Statistiken zusammengetragen werden mussten. Der zum Ende hin vorhandene Arbeitsstress hätte dabei durch einen im Vorfeld erstellten strengeren Zeitplan wahrscheinlich vermieden werden können.

Nun, da das Ende trotzdem erreicht wurde, möchte ich den vielen Personen, die mir im Zuge dieser Arbeit behilflich waren, danken, allen voran meiner Betreuungsperson, MMag<sup>a</sup> Veronika Uller, die mir speziell bei formalen Fragen zur Seite stand und mich antrieb, wenn es nötig war. Fachlichen Rat erhielt ich weiters von Univ. Prof. Dr. Viktor Obendrauf und Mag. Willibald Brugger, wobei ich erstem noch zusätzlich für die Bereitstellung einer Brennstoffzelle für das Experimentieren danke. Ein spezielles Dankeschön möchte ich zudem Dr. Beatrix Lenz, Dr. Christian Krotscheck sowie Ing. Karl Puchas für Informationen zum Steirischen Vulkanland und zur Hausenergieversorgung aussprechen.

Fabian Weißenbacher

Bad Gleichenberg, den 23.02.2010

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Brennstoffzellen.....	7
2.1. Funktionsprinzip und Aufbau.....	7
2.2. Chemische Reaktion.....	9
2.3. Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen.....	10
2.4. Brennstoffzellentypen.....	11
2.4.1. Die Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC bzw. PEMFC) .....	13
2.4.2. Die Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) .....	16
2.5. Brennstoffzellen-Heizgeräte.....	19
2.6. Entwicklungsstand von PEMFC- und SOFC-Heizgeräten.....	20
2.6.1. PEMFC-Heizgeräte .....	20
2.6.2. SOFC-Heizgeräte.....	21
3. Das Steirische Vulkanland.....	22
3.1. Leitbild.....	23
3.2. Energievision 2025 .....	24
3.3. Das Steirische Vulkanland in Zahlen .....	25
3.3.1. Wohnsituation.....	27
3.3.2. Energieverbrauch .....	29
4. Einsatz in Einfamilienhäusern.....	31
4.1. Dezentrale Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen.....	31
4.2. Technische Anforderungen an Brennstoffzellen-Energiesysteme.....	31
4.3. Technische Eignung von Brennstoffzellen-Heizgeräten.....	35
4.4. Wirtschaftlichkeit .....	36
4.5. Umweltaspekte .....	38
4.6. Problem der Brennstoffbeschaffung.....	42

---

4.7. Fazit .....	45
5. Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades einer PEM-Brennstoffzelle.	46
5.1. Untersuchte Brennstoffzelle .....	46
5.2. Experiment : Lastenaufzug .....	47
5.2.1. Zielsetzung .....	47
5.2.2. Versuchsaufbau.....	47
5.2.3. Versuchsablauf.....	49
5.2.4. Beobachtungen .....	50
5.2.5. Berechnung und Ergebnisse .....	51
6. Zusammenfassung .....	55
7. Literaturverzeichnis .....	57
Anhang.....	61
Erklärung.....	67
Arbeitsprotokoll .....	68

## 1. Einleitung

In der heutigen Zeit, einer Zeit bestimmt von Klimawandel und der Ungewissheit, wie lange konventionelle Energieträger noch (einfach) verfügbar sein werden, suchen immer mehr Politiker und Entscheidungsträger nach Auswegen aus unserer derzeitigen Energiesituation.

Alternativen zu Öl, Gas oder Kohle gäbe es viele, doch nicht viele haben das Potential, diese fossilen Energieträger mehr oder weniger vollständig zu ersetzen.

Die Wasserkraft, um ein Beispiel zu setzen, weist kaum noch ausnutzbares Potential auf, und oft würde die Ausnutzung eben jener die letzten noch intakten Naturräume zerstören. Und die Rückkehr zur Atomkraft kann man nur sehr bedingt als „umweltfreundlich“ auffassen, denke man nur an das bis dato nicht zufriedenstellend gelöste Problem der Endlagerung.

Welche andere Energiequelle könnte man also in Betracht ziehen?

Viele meinen, und das ist auch mein Standpunkt, dass Brennstoffzellen die notwendigen Voraussetzungen mit sich bringen würden, da sie durch ihre Umweltfreundlichkeit bestechen und sowohl in mobilen Systemen (PKW, LKW) als auch in stationären Anwendungen, wie Strom- und Wärmequellen für Gebäude, eingesetzt werden könnten.

Vorweg sei gesagt, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit bei den stationären Anwendungsgebieten der Brennstoffzelle liegt und deshalb auch nur auf diese Sparte eingegangen wird. Ein Grund für diese Entscheidung liegt darin, dass viele der Konzepte in diesem Bereich schon sehr weit ausgereift und teilweise sogar am Markt erhältlich sind.

Neben den theoretischen Ausführungen besteht ein wichtiger Bestandteil des Ganzen aber auch darin, zu demonstrieren, dass Brennstoffzellen schon heute als Lieferanten für elektrische Energie genutzt werden können. Zu dem Zweck wurde im Kleinen der Wirkungsgrad einer PEM-Brennstoffzelle bestimmt, die bei diesen Experimenten zum Tragen kommende Vorgehensweise und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 5 zusammengefasst.

Anknüpfend an den vorigen Absatz, noch ein Wort über den Aufbau dieser Arbeit: Zur besseren Übersicht wurde die Themenbehandlung in fünf zusammenhängende Kapitel gegliedert.

Zu Beginn, um den Einstieg in das Thema zu erleichtern, sollen das Kapitel 2: *Brennstoffzellen* und das Kapitel 3: *Steirisches Vulkanland* die Leserin/den Leser mit den Charakteristika der Brennstoffzellentechnik und des Steirischen Vulkanlands vertraut machen und eine Wissensbasis schaffen.

Das darauf folgende Kapitel 4: *Einsatz in Einfamilienhäusern* beschäftigt sich dann ganz mit der Frage nach der technischen bzw. wirtschaftlichen Realisierbarkeit eines Einsatzes von Brennstoffzellen als Quelle für Strom und Wärme für Einfamilienhäuser im Steirischen Vulkanland.

## 2. Brennstoffzellen

Das Gebiet der Brennstoffzellentechnologie genießt derzeit den Rang einer neuen, innovativen Forschungsrichtung, dabei wird häufig übersehen, dass das Prinzip der Brennstoffzelle bereits im Jahr 1839 entdeckt wurde. Maßgeblich daran beteiligt waren der deutsche Professor Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) sowie der walisische Physiker und Jurist Sir William Robert Grove (1811-1896). Letzterer, ein Kollege und Freund Schönbeins, erkannte, dass das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle einer Umkehrung der Elektrolyse entspricht. Die von ihm erdachte „Gasbatterie“ (siehe die unten stehende Abbildung 1) kann man somit als „Urahn“ aller Brennstoffzellen sehen (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.1).

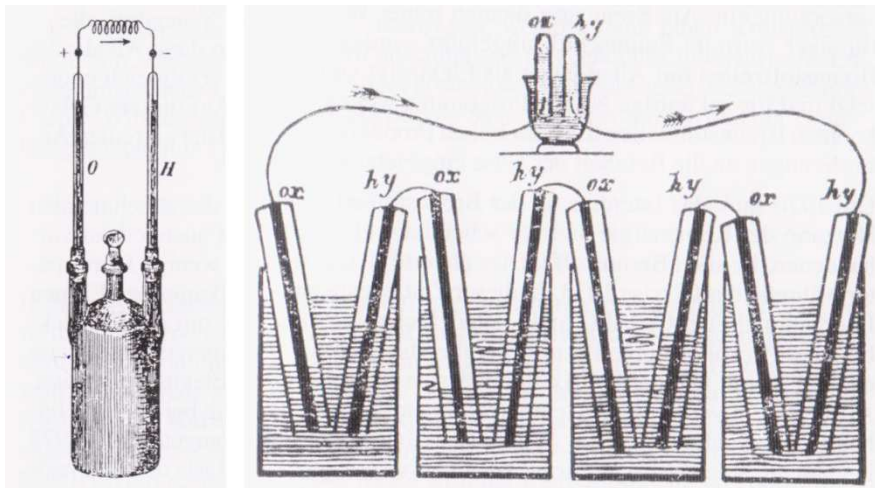


Abbildung 1: Eine Zelle der Grove'schen Gasbatterie (links) und Wasserstoff-Sauerstoff-Batterie Groves aus dem Jahre 1842 (rechts)  
Quelle: HEINZEL et al. 2006.

### 2.1. Funktionsprinzip und Aufbau

Das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle besteht im Grunde aus der Umkehrung des Vorganges der Elektrolyse, bei welcher, unter Einsatz von elektrischer Energie, Wasser ( $H_2O$ ) in Sauerstoff ( $O_2$ ) und Wasserstoff ( $H_2$ ) aufgespalten wird. Im Gegensatz dazu, reagieren in einer Brennstoffzelle Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser, wobei die entstehende Bindungsenergie in Form von elektrischer und thermischer Energie abgegeben wird (vgl. SIMADER, HEISSENBERGER 2000; S.12).

Der Aufbau ist je nach Brennstoffzellentyp verschieden, was auf unterschiedliche Eigenschaften (z.B. bezüglich Betriebstemperatur, verwendetem Elektrolyten), zurückzuführen ist, jedoch bestehen alle Brennstoffzellen aus folgenden Komponenten:

- Anode (negative Elektrode)
- Kathode (positive Elektrode)
- Elektrolyt

Die beiden Elektroden (Anode und Kathode), welche aus einem stromleitenden Material bestehen (z.B.: Graphit), sind durch den Elektrolyten getrennt, wobei dieser zugleich ionenleitend, gasundurchlässig und für Elektronen unpassierbar sein muss. Letzteres ist nötig, um Anode und Kathode elektrisch trennen zu können, denn diese Trennung sorgt dafür, dass die Elektronen bei ablaufender Reaktion über einen externen Verbraucher von der Anode zur Kathode fließen<sup>1</sup>, siehe die unten stehende Abbildung 2.

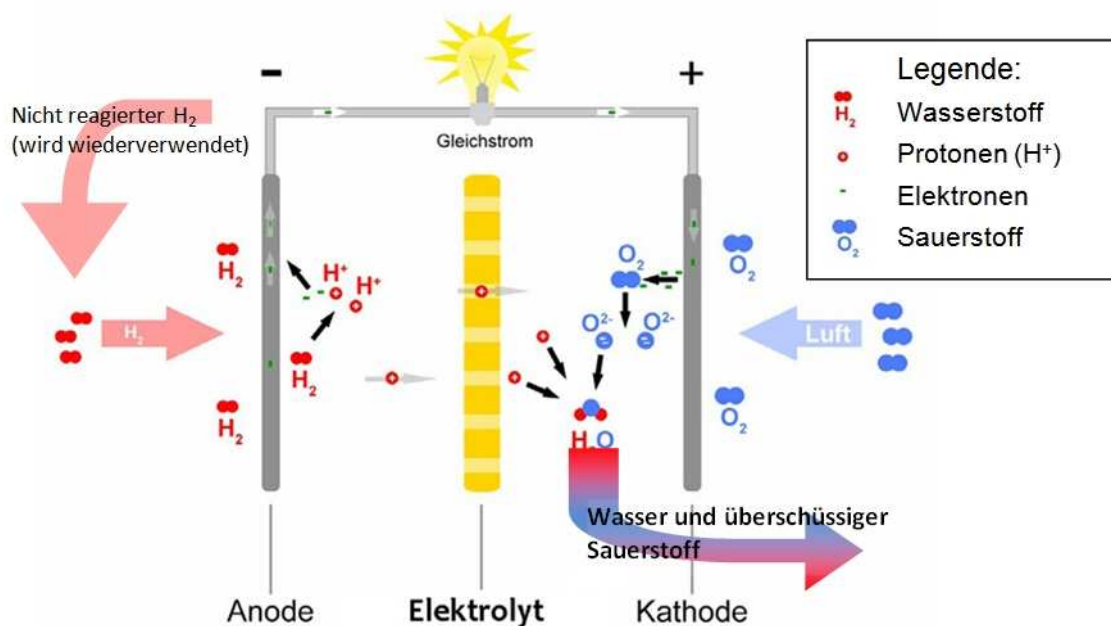


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle und Wege der einzelnen Reaktionsstoffe.  
Quelle: Adaption von: LINGG 2005.

<sup>1</sup> Anders formuliert: Wäre der Elektrolyt elektronenleitend, bestände für die Elektronen kein Zwang, „außen herum“ zu fließen, sie könnten direkt über den Elektrolyten von der Anode zur Kathode gelangen.

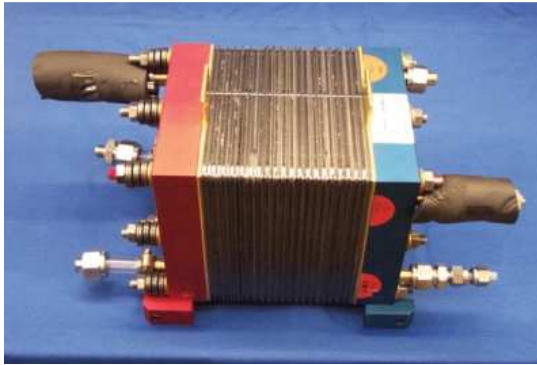


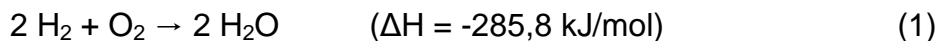
Abbildung 3: Zellstapel (= Stack)  
Quelle: MVV ENERGIE AG 2009.

Um höhere Gesamtspannungen zu erreichen, werden die einzelnen Brennstoffzellen in Serie geschaltet, zu einem Zellstapel, dem sogenannten Stack, wodurch sich die einzelnen Teilspannungen addieren (vgl. SIMADER, HEISSENBERGER 2000; S.12f).

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Brennstoffzellentypen, speziell was die Toleranz gegenüber Brenngasverunreinigungen anbelangt, müssen manchen Brennstoffzellenarten, abhängig vom verwendeten Brennstoff, zusätzliche Geräte zur Gasreinigung/reformierung vorgeschaltet werden, was den Gesamtwirkungsgrad herabsenkt. Generell gilt: Je niedriger die Betriebstemperatur, desto reiner muss das Brenngas sein.

## 2.2. Chemische Reaktion

Grundsätzlich reagieren in einer Brennstoffzelle, wie oben erwähnt, Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser:



Die Reaktion verläuft exotherm, also unter der Abgabe von Energie.

Allen Brennstoffzellen ist gemein, dass es sich bei der zentralen chemischen Reaktion um eine Redox-Reaktion handelt.

Die exakte chemische Reaktion variiert jedoch mit dem Typ der Brennstoffzelle und hängt einerseits von den verwendeten Ausgangsstoffen (z.B.: Methan, Methanol,...), andererseits auch von der Beschaffenheit des Reaktionsumfelds (Art des Elektrolyts bzw. der Elektroden) ab. Gerade bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen<sup>2</sup> können die zum Tragen kommenden Reaktionsgleichungen aufgrund der internen Reformierung erheblich vom unten angeführten Beispiel abweichen.

---

<sup>2</sup> siehe Kapitel:2.4.2: Die Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC).

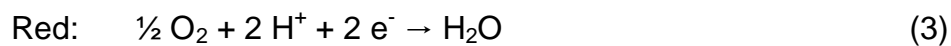
Die folgenden Reaktionsgleichungen geben jedenfalls die Teilreaktionen wieder, die in Phosphorsauren- und Polymermembran-Brennstoffzellen (PAFC bzw. PEMFC)<sup>3</sup> ablaufen.

Reaktion an der Anode (H<sub>2</sub>-Gas wird antransportiert):



Die positiv geladenen H<sup>+</sup>-Ionen, welche nur noch je aus einem Proton bestehen, wandern durch den Elektrolyt Richtung Kathode. Die frei gewordenen Elektronen fließen über den Stromkreis von der Anode zur Kathode und verrichten dabei elektrische Arbeit, wie in Abbildung 2 gezeigt.

An der Kathode reagieren die H<sup>+</sup>-Ionen zusammen mit den freien Elektronen und dem dort vorhandenen Sauerstoff wieder zu Wasser:



Das entstandene Wasser wird zusammen mit dem überschüssigen Sauerstoff von der Kathode entfernt. Anodenseitiges H<sub>2</sub>-Gas, welches nicht reagiert hat, kann wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden (vgl. SIMADER, HEISSENBERGER 2000; S.13).

### 2.3. Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen

Die wohl wichtigsten Vorteile von Brennstoffzellen in Bezug auf eine dezentrale Hausenergieversorgung sind die geringe Umweltbelastung und die Möglichkeit zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Im Vergleich zu rein thermischen Heizsystemen, wie zum Beispiel Öl- oder Gasbrennwertkessel, schneiden Brennstoffzellen in punkto Schadstoffemissionen in fast jedem Bereich besser ab, bei Betrieb mit reinem, umweltfreundlich erzeugtem Wasserstoff glänzen sie sogar mit der gänzlichen Vermeidung von Schadstoffen. Als KWK-Hausenergiesysteme sind Brennstoffzellen deshalb so interessant, weil sie neben einem hohen elektrischen Wirkungsgrad auch bei vergleichsweise niedriger Leistung sehr effizient arbeiten.

---

<sup>3</sup> Namensklärungen siehe Kapitel 2.4: *Brennstoffzellentypen*.

Weitere Punkte, die für Brennstoffzellen bzw. Brennstoffzellen-Heizgeräte sprechen, sind laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.51):

- geräuscharmer Betrieb
- hervorragendes Teillastverhalten
- geringer Wartungsbedarf aufgrund weniger bewegter Teile

Was die Nachteile von Brennstoffzellen anbelangt, so bestehen diese primär in der kosten- und energieintensiven Brennstoffzellenherstellung und der geringen Lebensdauer von Brennstoffzellen-Stacks.

Ein weiteres Problem von Brennstoffzellen ist auch die Verwendung von Werkstoffen, bei denen es aufgrund begrenzter Ressourcen oder einer ungleichen Verteilung derselben in Zukunft zu Engpässen kommen könnte. Laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.99) sind „vor allem die in der SOFC eingesetzten Materialien Yttriumoxid und Zirkonoxid als kritisch anzusehen“, unter anderem auch, weil bei ihnen in den letzten Jahren starke Preisanstiege zu verzeichnen waren (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.100).

## 2.4. Brennstoffzellentypen

Nach dem heutigen Stand der Technik kann man 6 verschiedene Typen unterscheiden, wobei man hauptsächlich nach Betriebstemperatur und verwendetem Elektrolyten einteilt. Hier eine Auflistung<sup>4</sup>:

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC)
- Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)
- Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC)<sup>5</sup>
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)
- Karbonatschmelze-Brennstoffzelle (MCFC)<sup>6</sup>
- Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup> In Klammern die englischen Abkürzungen, „FC“ steht hierbei immer für „fuel cell“ (= Brennstoffzelle).

<sup>5</sup> Engl. Abk.: „polymer electrolyte membrane fuel cell“ bzw. „proton exchange membrane fuel cell“

<sup>6</sup> Engl. Abk.: „molten carbonate fuel cell“.

<sup>7</sup> Engl. Abk.: „solid oxide fuel cell“.

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Typen und deren Anwendungsgebiete. Das Kürzel BHKW steht dabei für „Blockheizkraftwerk“.

Bezeichnung	Niedertemperatur-Brennstoffzelle				Hochtemperatur-BZ <sup>8</sup>	
	Alkalische BZ (AFC)	Direkt-Methanol-BZ (DMFC)	Polymermembran-BZ (PEMFC)	Phosphorsäure BZ (PAFC)	Karbonat-schmelze-BZ (MCFC)	Oxidkeramische BZ (SOFC)
Betriebstemp.	60-80 °C	80 - 130 °C	NT: 80 °C HT: 150-180 °C	200 °C	650 °C	800-1000 °C
Elektrolyt	Kalilauge	Polymermembran	Polymermembran	Phosphorsäure	Karbonat-schmelze in Matrix	Oxidkeramischer Elektrolyt
mobiles Ion im Elektrolyt	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Brenngas	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH (Methanol)	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Kohlegas	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Kohlegas, Biogas
Leistung	10 bis 100 kW	bis 100 kW	0,1 bis 500 kW	bis 10 MW	bis 100 MW	bis 100 MW
elektr. Wirkungsgrad: des Systems [einer einzelnen Zelle]	~60% bei H <sub>2</sub> -Betrieb [60 - 70%]	[20 - 30%]	43 - 50% bei Erdgasbetrieb samt externen Reformer [50-68%]	40 - 42% [55%]	45 - 50 % bei Erdgasbetrieb und interner Reformation  60% in Kombination mit Dampfturbine (reine Stromerzeugung) [65%]	45 - 50 % bei Erdgasbetrieb und interner Reformation  60% in Kombination mit Gasturbine (reine Stromerzeugung) [60 - 65%]
Anwendung:	Raumfahrt, Militär	Elektroantenne, Batterieersatz, portable Stromerzeuger	Elektroantenne, BHKW, Batterieersatz, Raumfahrt, Militär	BHKW	BHKW	BHKW

Tabelle 1: Übersicht über die Brennstoffzellentypen

Quelle: Eigene Erstellung nach: SCHMIDT 2006 bzw. HEINZEL et al. 2006.

<sup>8</sup> BZ = Brennstoffzelle.

Wie in Tabelle 1 anhand der Leistungsdaten ersichtlich, kämen grundsätzlich alle Brennstoffzellentypen für die Hausenergieversorgung in Frage, da der ungefähre Leistungsbereich von ca. 5-10 kW (thermisch + elektrisch) von allen erreicht wird.

In der Praxis konzentrieren sich die Hersteller jedoch (fast) nur auf PEMFC- und SOFC-Systeme, da diesen am meisten Potential zugesprochen wird. Der Konkurrenzdruck aber auch die Kooperation untereinander führen jedenfalls dazu, dass jene Brennstoffzellen weit ausgereift sind, als Gesamtsystem (Brennstoffzelle + Peripheriegeräte) schon gut in bestehende Heizungsinfrastruktur integrierbar sind und es eine relativ große Anzahl an verschiedenen Modellen gibt.

Da wegen der oben genannten Gründe das Erreichen der Marktreife hier am ehesten realisierbar scheint, werden in dieser Arbeit nur Brennstoffzellen-Heizgeräte auf Basis einer dieser beiden Typen behandelt.

Der Vollständigkeit halber werden hier noch die Punkte aufgeführt, die gegen den Einsatz der anderen Brennstoffzellen sprechen:

PAFC und MCFC fallen weg, weil diese Brennstoffzellenarten derzeit für höhere Leistungsbereiche, wie den Einsatz in BHKWs konzipiert sind und deshalb für die Versorgung eines einzelnen Gebäudes eindeutig überdimensioniert wären.

AFC und DMFC werden, laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.49): „in mittelfristiger Zukunft für die stationäre Energieumwandlung keine Rolle spielen“, auch wenn sie sich beide im Grunde für den Einsatz eignen (was teilweise sogar demonstriert wurde). Jedoch gibt es kaum Hersteller bzw. Entwickler, welche sie als System zur Hausenergieversorgung in Betracht ziehen und die Idee weiterentwickeln, da ihre eigentlichen „Standardeinsatzgebiete“ woanders liegen.<sup>9</sup>

#### 2.4.1. Die Polymermembran-Brennstoffzelle (PEMFC bzw. PEMFC)

Dieser Typ der Brennstoffzelle, der zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen gehört, wird durch seinen speziellen Elektrolyten gekennzeichnet. Dieser besteht aus einer protonenleitenden Membran, welche auf einem perfluorierten, sulfonierten

---

<sup>9</sup> Portable Kleingeräte gelten als Standardeinsatzgebiet für die DMFC. Die AFC findet hauptsächlich in Militär und Raumfahrt Verwendung.

Polymer basiert. Die Abkürzung PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)<sup>10</sup> leitet sich von ebendieser Membran ab.

Die Polymermembran erfüllt in der Brennstoffzelle neben ihrer Funktion als Elektrolyten noch drei andere zentrale Aufgaben: Sie trennt das Anodengas Wasserstoff vom Kathodengas Sauerstoff (zur Verhinderung einer Knallgasexplosion), sorgt für die elektrische Abtrennung der Anode zur Kathode und trägt auf beiden Seiten die reaktionsbeschleunigenden Katalysatoren (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.11).

Der grundlegende Aufbau der PEMFC und die betreffenden chemischen Reaktionen werden hier nicht weiter behandelt, sie werden in den Kapiteln 2.1 und 2.2 im Rahmen der allgemeinen Erläuterung einer Brennstoffzelle erklärt, da die PEMFC dort aufgrund ihres einfachen Aufbaus als Beispiel dient.

Als Brenngas kommt bei der PEMFC Wasserstoffgas ( $H_2$ ) zum Einsatz, welches von sehr hoher Reinheit sein muss, da Verunreinigungen die Wirksamkeit der Brennstoffzelle vermindern, unter Umständen sogar dauerhaft. Besonders empfindlich ist die Zelle dabei gegenüber Kohlenmonoxid (CO), da dieses den an der Anode eingesetzten Edelmetallkatalysator Platin in kürzester Zeit funktionsunfähig macht. Das in der PEMFC eingesetzte Brenngas darf deshalb maximal über einen CO-Gehalt von 10-20 ppm verfügen. Wird das Brenngas Wasserstoff nun, wie derzeit üblich, durch die Reformierung von Methan (Hauptbestandteil von Erdgas) gewonnen, so muss zusätzlich zum allgemeinen Reformierungsprozess in Reformier- und Shift-Konverter noch eine eigene, aufwändige Stufe zur Gasfeinreinigung eingesetzt werden, die den CO-Gehalt des aus dem Shift-Konverter kommenden Reformatgases von ca. 1% auf die oben erwähnten 10-20 ppm reduziert (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.12).

Grundsätzlich muss man bei Polymer-Brennstoffzellen auch zwischen Niedrigtemperatur- und Hochtemperatur-PEMFCs unterscheiden:

*Hochtemperatur(HT)-PEMFCs* zeichnen sich durch eine temperaturbeständigere Membran auf Polybenzimidazol-Basis (PBI) aus, weshalb sie in einem Tempera-

---

<sup>10</sup> Wörtlich übersetzt aus dem Englischen: Protonen-Austausch-Membran Brennstoffzelle.

turbereich von 150-180 °C betrieben werden können, was die Auskoppelung von Wärme erleichtert. Die Struktur von PBI ist in Abbildung 4 dargestellt.

*Niedrigtemperatur(NT-)-PEMFCs* haben im Gegensatz dazu eine maximale Betriebstemperatur von 80 °C (siehe Tabelle 1), was sie jedoch für den Einsatz in Kleingeräten wie Handys und Laptops interessant macht, da dort unnötige Wärmeentwicklung eher von Nachteil ist (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.47 bzw. SCHMIDT 2006; S.7f).

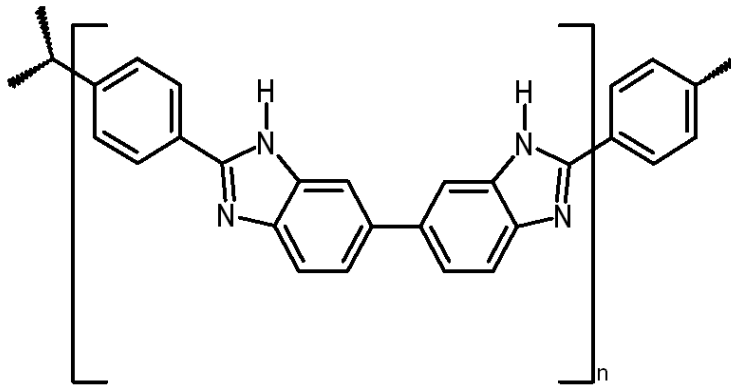


Abbildung 4: Strukturformel von Polybenzimidazol (PBI)

Quelle: Adaption von: WIKIMEDIA 2010.

Neben dem in dieser Arbeit behandelten möglichen Einsatz von PEMFCs in der Hausenergieversorgung, gilt die PEM-Brennstoffzelle auch als vielversprechende Alternative zu konventionellen Energiequellen (Verbrennungsmotoren) im Bereich Mobilität, unter anderem wegen der geringen Emissionen und dem hohen Wirkungsgrad im niedrigeren Leistungsbereich (= Stadtverkehr), auf den ein Großteil der gefahrenen Kilometer entfällt.

Anmerken muss man jedoch, dass vor einem Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen das derzeit noch bestehende Problem der Wasserstoffspeicherung gelöst werden muss, was einerseits durch Verbesserung der Speichertechniken in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht erreicht werden könnte (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.121f und S.128). Andererseits würde aber auch eine Verbesserung der Anbord-Wasserstoffreformierung aus Erd-/Biogas den Einsatz in Fahrzeugen erleichtern.

Weitere mögliche Anwendungsgebiete sind, wie oben erwähnt, der Einsatz in Kleingeräten (Laptops etc.) als Batterieersatz, jedoch weiters die Verwendung als

kombinierter Strom- und Wärmeversorger von Wohnhäusern sowie die Nutzung für die dezentrale Stromversorgung (vgl. SIMADER, HEISSENBERGER 2000; S.22f).

#### 2.4.2. Die Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Oxidkeramische Brennstoffzellen werden zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen gezählt, da ihre optimale Betriebstemperatur zwischen 800 und 1.000 °C liegt.

Der namensgebende feste Elektrolyt ist eine Keramik, meist handelt es sich um mit Yttrium stabilisiertes (bzw. dotiertes) Zirkondioxid ( $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ ) (vgl. DROSTEFranke 2009; S.48), welches gasundurchlässig ist und ab Temperaturen um 750 °C Sauerstoffionen ( $\text{O}^{2-}$ ) gut leiten kann (vgl. HEINZEL et al. 2009; S.15).

Diese Ionen sorgen für die Ladungsübertragung im Elektrolyt, vergleichbar mit den  $\text{H}^+$ -Ionen bei der PEMFC. Der große Unterschied zur PEMFC besteht jedoch darin, dass die Ladungsträger der SOFC nicht von Anode zu Kathode wandern, sondern genau umgekehrt: Die  $\text{O}^{2-}$ -Ionen werden durch Reduktion dissoziierter  $\text{O}_2$ -Moleküle an der Kathode gebildet, von wo sie durch den Elektrolyten in Richtung Anode wandern, um mit den dortigen  $\text{H}_2$ -Molekülen zum Endprodukt Wasser zu reagieren, wie in Abbildung 5 verdeutlicht.

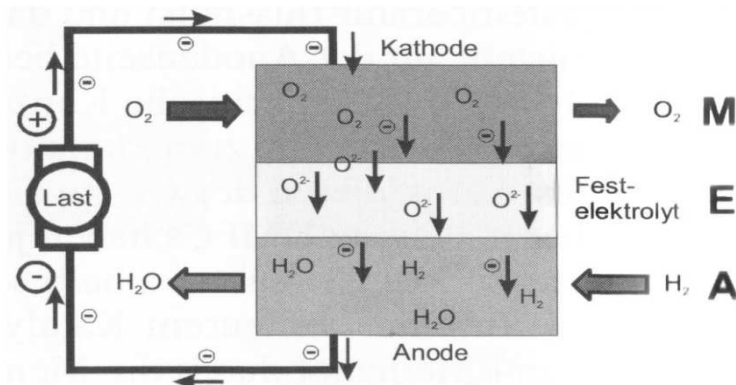


Abbildung 5: Reaktionsverlauf bei der SOFC.  
Quelle: Adaption von: HEINZEL et al. 2006.

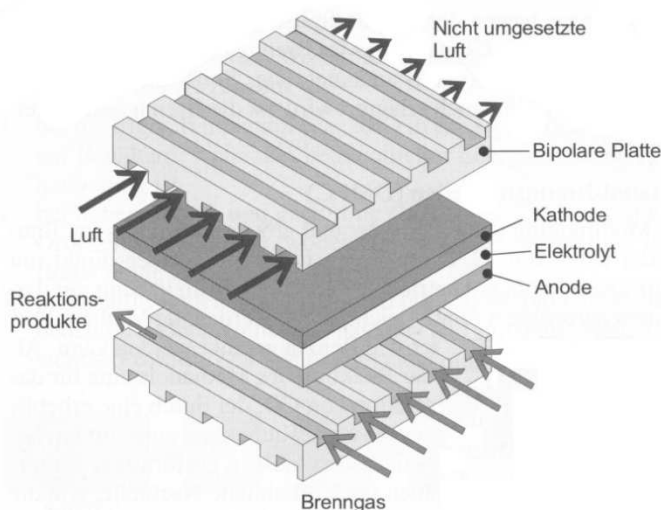
Dem Obigen entsprechend kann man wie folgt schreiben:



Die Elektronen wandern dabei, wie in jeder Brennstoffzelle, über einen äußeren Leiter von der Anode zur Kathode, bei der SOFC sorgen sie dabei an der Kathode für die Bildung der  $O^{2-}$ -Ionen.

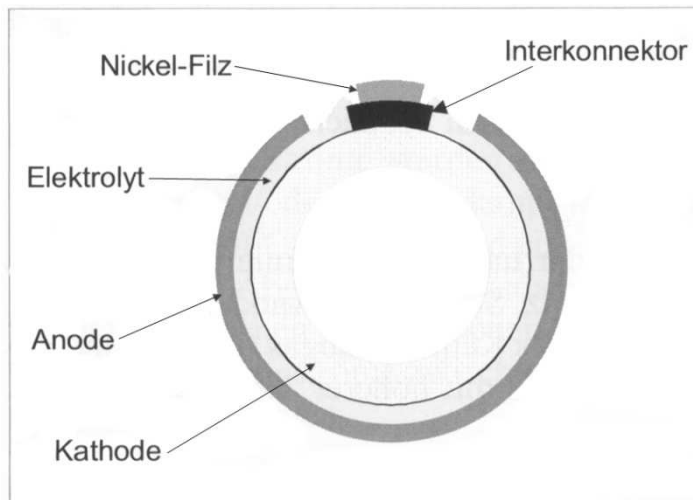
So wie man die PEMFC in NT- und HT-PEMFCs unterteilen kann, hat man bei oxidkeramischen Brennstoffzellen die Möglichkeit, anhand des Aufbaus der Zelle zwischen Flachbau- und Röhrenkonzept zu unterscheiden.

Flachbauzellen besitzen einen planaren Aufbau und verfügen über sogenannte Bipolarplatten, welche für die Leitung des elektrischen Stroms, für Zu- und Abführung der gasförmigen Edukte und Produkte sowie für die Trennung der Gasräume verantwortlich sind. Abbildung 6 zeigt den Aufbau einer solchen planaren SOFC-Zelle (vgl. HEINZEL et al. 2006; S. 228).



**Abbildung 6: Aufbau einer planaren SOFC.**  
Adaption von: HEINZEL et al. 2006.

Bei tubulärem Aufbau (= Röhrenzellen) hingegen besitzt der Elektrolyt die Form einer an einem Ende verschlossenen Röhre. Er wird dabei von der Anode umschlossen und trägt auf seiner Innenseite die Kathodenschicht. Die Zuführung von Sauerstoff bzw. Luft erfolgt über das Röhreninnere, das Brenngas Wasserstoff umströmt die Zelle von draußen. Die Abnahme von elektrischem Strom erfolgt über die Anode und mithilfe eines sogenannten Interkonnektors und eines Nickel-Filzes über die Kathode, wie man in Abbildung 7 sehen kann (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.253f).



**Abbildung 7: Aufbau einer tubulären SOFC.**  
Quelle: Adaption von: HEINZEL et al. 2006.

Die Vorteile der SOFC gegenüber anderen Brennstoffzellentypen ergeben sich aus der hohen Betriebstemperatur, da diese die Auskoppelung von Wärmeenergie erleichtert und zudem die interne Reformation ermöglicht.

Gemeint ist damit, dass die Reformation, also die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen zu dem eigentlichen Brenngas Wasserstoff, direkt in der Zelle bzw. in unmittelbarer Umgebung selbiger erfolgt, wobei die Abwärme der eigentlichen Zellreaktion die Energie für die Reformationsreaktionen liefert. Die Nutzung der Abwärme führt zu einem höheren Systemwirkungsgrad, da nicht zusätzlich Energie für einen externen Reformator aufgewendet werden muss. Zudem sinkt auch der Kühlluftbedarf innerhalb der Zelle, da die endothermen Reformationsreaktionen einen Teil der (überschüssigen) Wärmeenergie aufnehmen und in Energie in Form von Wasserstoff umsetzen (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.206).

Ein weiterer Vorteil der SOFC besteht darin, dass Kohlenmonoxid (CO) kein Katalysatorgift darstellt und auch als zusätzlicher Brennstoff benutzt werden kann, was die Energieausbeute steigert (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.227).

Laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.49) bestehen die Nachteile der SOFC in den hohen Anforderungen an potentielle Werkstoffe (besonders die Hitzefestigkeit betreffend) und in der „noch unzureichenden Zyklfestigkeit“, also der geringen Toleranz der Brennstoffzelle gegenüber Aufheiz- und Abkühlvorgängen.

Die SOFC bietet sich wegen der hohen Betriebstemperatur für einen Einsatz in Form von Blockheizkraftwerken unter Ausnützung der Kraft-Wärme-Kopplung an,

bei denen die Abwärme in Form von Nah/Fernwärme nachgenutzt wird (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.257).

Neben dem Einsatz als Hausenergiequelle ist es weiters auch vorstellbar, große SOFC-Anlagen mit einer nachgeschalteten Gasturbine oder einem nachgeschalteten Gas-und-Dampf-Prozess<sup>11</sup> für die dezentrale Stromversorgung einzusetzen (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.49 bzw. HEINZEL et al. 2006; S.257).

## 2.5. Brennstoffzellen-Heizgeräte

Es ist einleuchtend, dass ein Brennstoffzellen-Stack rein in der in Kapitel 2.1 beschriebenen Form nicht als Hausenergiequelle eingesetzt werden kann. Vielmehr ist er ein Teil eines Gesamtsystems, welches als Brennstoffzellen-Heizgerät zusammengefasst wird. Es besteht neben dem Stack und dem Gehäuse aus verschiedenen Peripheriegeräten, ohne die der Energieumwandlungsprozess nicht durchgeführt werden könnte, wie Regelelektronik, Wärmetauscher, Wechselrichter und selbstverständlich Zu- und Ableitungen für Brennstoff, Luft und Abgase.

Für PEMFC-Heizgeräte sind zudem ein Reformer für die Wasserstoffgewinnung sowie Shift-Reaktoren und eine Gasfeinreinigungsstufe für die Entfernung von CO aus dem Reformatgas erforderlich.

Die Funktionsweise eines solchen Heizgerätes beruht auf der Kraft-Wärme-Kopplung: Der Brennstoff gelangt in die Brennstoffzelle, wo er in Gleichstrom und Abwärme umgewandelt wird. Der elektrische Strom wird über einen Wechselrichter in an das Spannungsniveau im Haushalt angepassten Wechselstrom umgewandelt. Dieser kann im Versorgungsobjekt selbst verwendet und/oder ins Netz eingespeist werden. Die Abwärme des Brennstoffzellen-Stacks hingegen wird über einen Wärmetauscher auf einen Heiz- oder Warmwasserkreislauf übertragen. Ein Teil der Wärmeenergie kann dabei jedoch nicht genutzt werden und wird mit dem Abgas abgeführt.

---

<sup>11</sup> Kombination aus Dampf- und Gasturbinen mit hohem Wirkungsgrad.

## 2.6. Entwicklungsstand von PEMFC- und SOFC-Heizgeräten

### 2.6.1. PEMFC-Heizgeräte

Die PEM-Brennstoffzelle ist derzeit Basis der meisten dezentralen Energieversorgungssysteme im Bereich der Hausenergieversorgung, was auf den günstigen Leistungsbereich von 1-5 kW<sub>el</sub> zurückgeführt werden kann. Zu den marktführenden Herstellern zählen auch europäische Firmen, Beispiele sind *Vaillant* und *Viessmann*, welche seit 1998 bzw. 2000 in der Branche erfolgreich aktiv sind (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.51 bzw. S.59f).

Der derzeitige Stand der Technik für die protonenleitende Membran ist eine sulfonierte Teflon-Membran, wie z.B. *Nafion®* vom Membranhersteller *DuPont*. (vgl. DROSTE-FRANKE; S.47).

Die Herstellungskosten (für den Stack allein) liegen im Schnitt bei 5.000-10.000 €/kW<sub>el</sub>, hinzu kommen noch Kosten für Peripheriegeräte (z.B.: Reformer, Shift-Konverter oder CO-Konverter). Das Gesamtsystem umfasst Brennstoffzelle, Peripheriegeräte sowie eine Steuereinheit und besitzt in etwa die Größe eines konventionellen Heizkessels. Das PEMFC-Heizgerät *GAMMA 1.0* weist beispielsweise Maße von 60 x 60 x 160 cm auf.

Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, welche die PEM betreffen, werden seit mehreren Jahren stark forciert, besonders hinsichtlich eines Einsatzes in PKWs und LKWs, da der PEM dort viel Potential zugeschrieben wird. Weiters im Interesse der Forscher befindet sich die Hochtemperatur-PEMFC, welche eine im Vergleich zur normalen PEMFC eine relativ hohe Betriebstemperatur von ca. 150-180 °C aufweist, womit eine größere Toleranz gegenüber Brenngasverunreinigungen einhergeht, weshalb eine weniger aufwändige Gasreinigung nötig ist. Möglich macht dies eine temperaturfestere Membran auf Polybenzimidazol(= PBI)-Basis (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.47f bzw. S.59).

### 2.6.2. SOFC-Heizgeräte

Dieser Brennstoffzellentyp wird zwar nicht von so vielen Herstellern beforscht und weiterentwickelt wie die PEMFC, doch es gibt einige sehr treue und nicht minder erfolgreiche Verfechter der Technologie, wie zum Beispiel *Hexis* oder *Ceramic Fuel Cells Limited*.

Erstere Firma ist schon seit 1997 in der Brennstoffzellen-Entwicklung tätig, vor 2005 noch unter dem Namen *Sulzer-Hexis*, und hat sich auf BZ-Heizgeräte für Einfamilienhäuser spezialisiert. Das derzeit neueste Modell *Galileo 1000N* liefert 1 kW elektrische und max. 22,5 kW thermische Energie (2,5 kW vom Brennstoffzellen-Stack, 20 kW vom integrierten Zusatzbrenner), bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 25-30% und einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 85%. Das Gesamtsystem ist mit Abmessungen von 55 x 55 x 160 cm und 3 m<sup>2</sup> Platzbedarf (inkl. Serviceraum) mit herkömmlichen Gas/Ölheizgeräten vergleichbar. Weiters werden durch modulare Bauweise und Verwendung marktüblicher Peripheriegerätee Installation und Wartung vereinfacht (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.247). Angaben zu den Produktionskosten für das Modell *Galileo 1000N* konnten seitens des Herstellers *Hexis* leider nicht gemacht werden, da es sich bei der Modellreihe noch um Prototypen in der Feldtestphase handelt. Aus DROSTE-FRANKE 2009 (S.51) lässt sich jedoch erkennen, dass derzeit für diese Brennstoffzelle mit Stack-Kosten von über 10.000 € zu rechnen ist, wobei der Stack etwa ein Drittel des Gesamtpreises ausmacht.

### 3. Das Steirische Vulkanland



Das Steirische Vulkanland repräsentiert den Zusammenschluss von mittlerweile 79 Gemeinden aus der Südoststeiermark zu einer eigenständigen Region, mit dem erklärten Ziel, eigene regionale Besonderheiten hervorzuheben und zu fördern.

Die Abbildungen auf dieser Seite zeigen die Lage des Vulkanlandes und eine Übersicht der Mitgliedsgemeinden.

**Abbildung 8: Lage des Steirischen Vulkanlandes**  
 Quelle: Eigene Erstellung nach GOOGLE MAPS 2009 bzw. VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2009.



**Abbildung 9: Mitgliedsgemeinden des Steirischen Vulkanlandes**  
 Quelle: VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2009.

### 3.1. Leitbild

Die Entscheidungen des Steirischen Vulkanlands erfolgen anhand bestimmter gemeinsamer Wertvorstellungen und zum Zweck der Erreichung gemeinsamer Ziele. Diese wurden im Vorfeld von den Vorstandsmitgliedern und den mitwirkenden Gemeinden unter großer Beteiligung der Bevölkerung erarbeitet, und 2001 mit der Gründung des „Vereins zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes“ festgehalten. Im Bericht zur Vollversammlung im März 2006 mit dem Titel „Der Vulkanlandweg. Mit Beharrlichkeit ans Ziel“ werden diese aufgeführt.

Das erklärte Hauptziel ist demnach „eine Wohlstands- und Lebensqualitätssteigerung für alle Menschen des Steirischen Vulkanlandes“. Erreichen will man das in einem längerfristigen Wandel durch einen ganzheitlichen Regionalentwicklungsprozess und durch gemeinsames, eigenständiges und nachhaltiges Handeln.

Weitere wichtige Punkte sind:

- Schaffung und Stärkung eines Regionalbewusstseins
- Sichtbarmachen und Inwertsetzen des in dem Gebiet Bestehenden, wie zum Beispiel das Hervorheben lokaler Besonderheiten.
- Starke Bürgerbeteiligung (durch Workshops, Zukunftswerkstätten, Innovationspreise, Vorträge etc.)
- Positionierung des Steirischen Vulkanlandes als eine Region des Handwerks, der Kulinarik und der Lebenskraft.
- Erreichen der Energieautarkie bis 2025 (= „*Energievision 2025*“)

Weiter festgehalten wurde die Einführung des Logos „Steirisches Vulkanland“, welches in Abbildung 10 dargestellt ist.



Abbildung 10: Logo des Steirischen Vulkanlandes.

Quelle: VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2009.

Dieser Schritt hat sich mittlerweile als ein voller Erfolg bewiesen, denn man erreicht Bekanntheitsgrade von rund 96 Prozent innerhalb des Vulkanlandes und

wird weit über die Grenzen desselben hinaus als Vorzeigeprojekt angesehen (vgl. VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2006; S.9f bzw. S.18).

### 3.2. Energievision 2025

Bis jetzt nicht erwähnt wurde die in Bezug auf diese Arbeit wohl interessanteste Zielsetzung des Steirischen Vulkanlandes, nämlich das Erreichen vollständiger Energieautarkie in der Region bis zum Jahr 2025. Die Energievision 2025 wurde 2006 im Rahmen der Hauptversammlung des Vereins zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes beschlossen.

Ziel ist es, ab 2025 100% der Energie für Wärme bzw. Warmwasser, 100% des elektrischen Stroms und 100% der benötigten Treibstoffe nachhaltig innerhalb der Region zu erzeugen. Die dazu nötigen Maßnahmen wurden vom Steirischen Vulkanland in Kooperation mit dem Abfallwirtschaftsverband Radkersburg im Rahmen des INTERREG III-A Projektes „*EnergieWirtschaft Radkersburg*“ erarbeitet und im „*Kleinregionalen-Entwicklungskonzept (KEK) – Energie ‚Radkersburg-West‘ 2007-2011*“ festgehalten (vgl. KROTSCHECK, PUCHAS 2007).

Kernpunkte des Konzeptes sind die Erhöhung des Anteils von erneuerbaren, regionalen Energieträgern an der Strom/Treibstoffproduktion sowie an der Energie für Wärme/Warmwasser. Gleichzeitig soll der Verbrauch von Strom/Wärme/Treibstoffen reduziert werden, u.a. durch Stromsparmaßnahmen (kein Standby), thermische Sanierung von öffentlichen und privaten Gebäuden, Einbau effizienterer Heizkessel uvm.

Für Heizenergie und Stromproduktion wird Biomasse (Holz, agrarische Reststoffe etc.), als Hauptenergieträger angestrebt. Im Bereich Mobilität sollen Biogas, Biodiesel und Pflanzenöl die fossilen Treibstoffe Diesel, Benzin oder Erdgas ersetzen. Um die ausreichende Produktion von Biomasse in Form von Energiepflanzen bzw. agrarischen Reststoffen zu gewährleisten will man gezieltes Landmanagement betreiben, indem man versucht, genügend Flächen für den Anbau derselben zu erschließen, ohne dabei die Nahrungsmittelproduktion in Gefahr zu bringen.

Zusätzlich zu dem bereits Genannten soll die Bevölkerung durch verstärkte Bewusstseinsbildung mithilfe massiver Öffentlichkeitsarbeit (Internet, Gemeindezei-

tung, Vorträge, Seminare, Info-Abende, Ideen-Wettbewerbe etc.) zum Mitwirken am Projekt animiert werden.

All diese Maßnahmen sollen im Zeitraum von 2007-2011 innerhalb einer Pilotregion, der Kleinregion Radkersburg-West, umgesetzt werden, um Erfahrungen mit dem Umstieg auf erneuerbare, regionale Energiequellen zu sammeln. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen dann auf das gesamte Vulkanland übertragen werden.

Um auf die anfangs getätigte Aussage zu sprechen zu kommen, wonach die Energievision des Vulkanlandes besonders interessant für diese Arbeit sei, so muss man durchaus sagen, dass Brennstoffzellen in dem jetzigen Konzept der Energievision keine Rolle spielen vor allem da, nach Angaben eines Vulkanland-zuständigen (Dr. Christian Krotscheck), der Hauptfokus des Vulkanlandes auf der Biomasetechnologie liege und Brennstoffzellen derzeit noch nicht die nötigen Anforderungen erfüllen würden.

Jedoch lässt die generelle Bereitschaft der Vulkanland-Mitglieder, neue Wege zu gehen und visionär zu denken trotzdem Raum für eine zukünftige Befassung mit dem Thema Brennstoffzellen offen.

Zudem stellt jeder Ansatz, von konventionellen Energieträgern wegzukommen, wie eben die Energievision 2025, immer auch eine Möglichkeit für alternative Energiequellen wie die Brennstoffzelle dar.

### **3.3. Das Steirische Vulkanland in Zahlen**

Heute sind 79 Gemeinden im Vulkanland Mitglied. Diese Kapitel soll Aufschluss bringen über die Entwicklung der Anzahl der Mitgliedsgemeinden, der Bevölkerung und der Fläche des Steirischen Vulkanlandes.

In Abbildung 11 ist die Entwicklung der Zahl der Mitgliedsgemeinden des Steirischen Vulkanlandes von 1994 bis heute dargestellt. Die Werte vor 2001 stehen dabei eigentlich für die Mitgliederanzahlen der Vorgängergemeinschaften des Steirischen Vulkanlandes, da dieses formell erst seit seiner Gründung 2001 existiert.

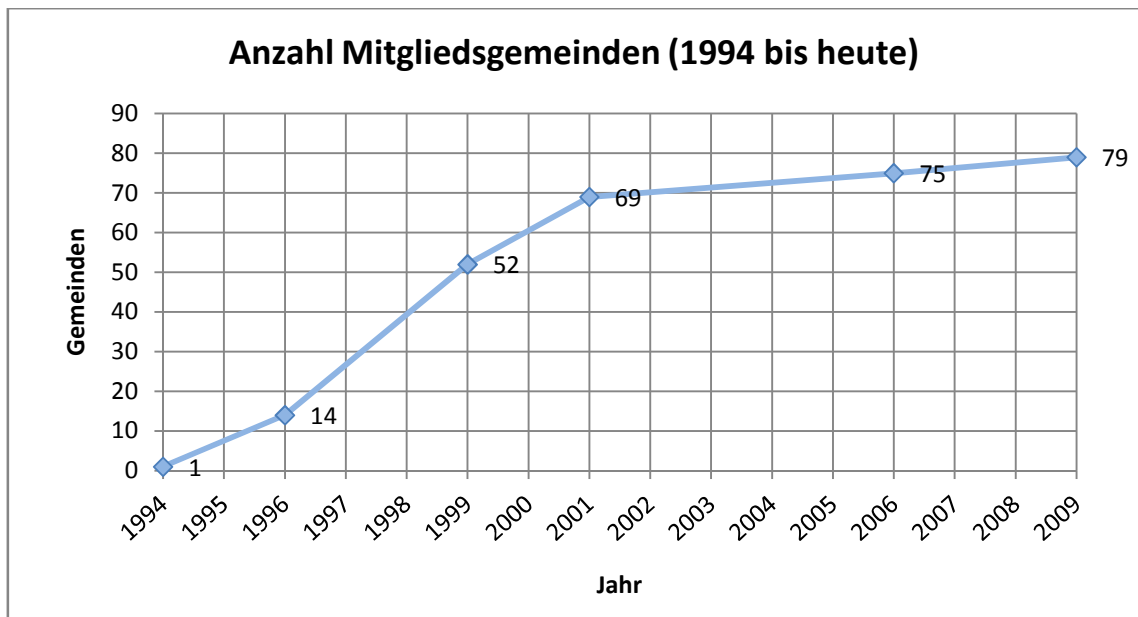


Abbildung 11: Anzahl der Mitgliedsgemeinden des Steirischen Vulkanlandes von 1994 bis heute.  
Quelle: Eigene Erstellung nach: LENZ 2010.

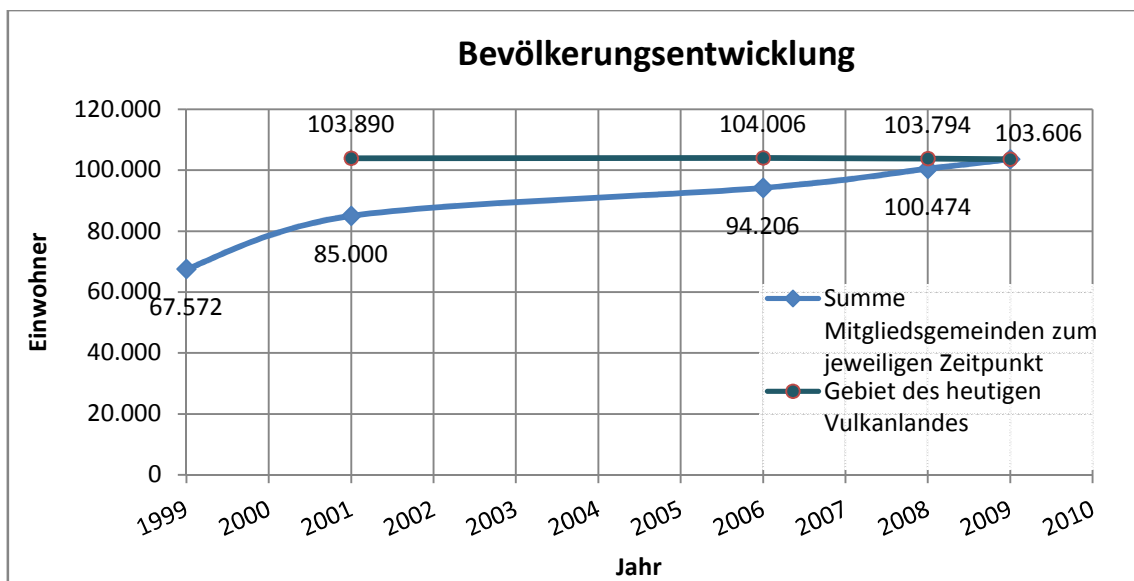


Abbildung 12: Bevölkerungsentwicklung im Steirischen Vulkanland von 1999 bis heute.  
Quelle: Eigene Erstellung nach: STATISTIK AUSTRIA 2004; LANDESSTATISTIK STEIERMARK 2006 bzw. 2009a

Abbildung 12 zeigt die Bevölkerungsentwicklung im Steirischen Vulkanland. Die Anzahl der Bewohner im Vulkanland steigt relativ schnell, was sich jedoch auf die sich erhöhende Zahl der Mitgliedsgemeinden zurückführen lässt. Die eigentliche Bevölkerungsentwicklung lässt sich besser abschätzen, indem man über den ganzen Zeitraum das Gebiet des heutigen Vulkanlandes betrachtet. Hier erkennt man, dass die Bevölkerungszahl nahezu konstant bzw. leicht rückgängig ist.

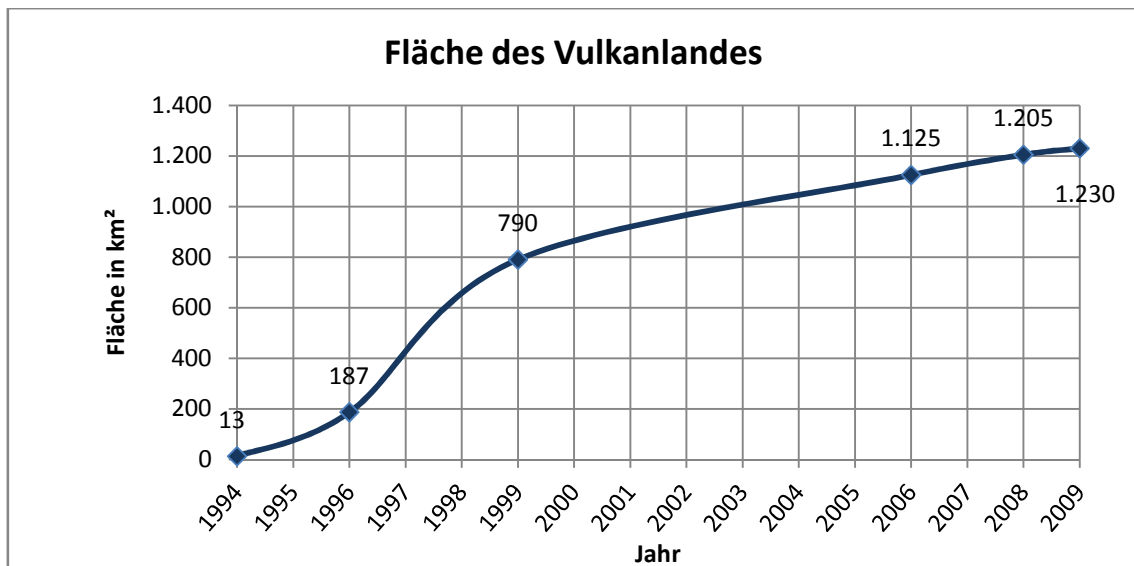


Abbildung 13: Fläche des Steirischen Vulkanlandes 1994 bis heute.

Quelle: Eigene Erstellung nach: LANDESSTATISTIK STEIERMARK 2009b; LANDESRECHNUNGSHOF STEIERMARK 2008 sowie VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2001, 2006 und 2009.

Die Abbildung 13 zeigt das flächenbezogene Wachstum des Steirischen Vulkanlandes durch den Beitritt neuer Mitgliedsgemeinden von 1994 bis heute, wobei es sich bei den Werten der Jahre vor 2001, wie schon im Text zu Abbildung 11 erläutert, streng genommen nicht um die Ausdehnung des Steirischen Vulkanlandes zum jeweiligen Zeitpunkt handelt, da man erst seit seiner Gründung im Jahr 2001 formell vom Steirischen Vulkanland sprechen kann. Vielmehr spiegeln diese Werte die Gebietsgröße der Vorgängergemeinschaften des Steirischen Vulkanlandes wider. Zu Beginn der Vulkanlandidee war dies die Gemeinde Auersbach, später die Kleinregion Feldbach, deren Mitglieder 2001 mit weiteren Gemeinden das Steirische Vulkanland aus der Taufe hoben.

### 3.3.1. Wohnsituation

Die aktuellsten Daten zu Wohnsituation im Steirischen Vulkanland findet man in den Ergebnissen der Probezählung 2006 der Statistik Austria (vgl. STATISTIK AUSTRIA 2006). Dieser Erhebung zufolge gab es in jenem Jahr 28.066 Einfamilienhäuser innerhalb der Grenzen des heutigen Vulkanlandes, was 82,8% aller in dem Gebiet erfassten Gebäude entspricht. Die Zahl der Mehrfamilienhäuser, belief sich auf 3.381 Gebäude, solange man als Mehrfamilienhaus alle Wohngebäude mit zwei oder mehr getrennten Wohneinheiten auffasst.

Interessant ist auch der Vergleich mit dem Jahr 2001, weil damals im Rahmen der Volkszählung eine „Gebäude- und Wohnungszählung“ durchgeführt wurde, welche einen genauen Blick auf die damalige Wohnsituation ermöglicht. Laut dieser Zählung betrug die Zahl der Einfamilienhäuser<sup>12</sup> 26.703, die Zahl der Mehrfamilienhäuser 2.893 Gebäude (vgl. STATISTIK AUSTRIA 2004).

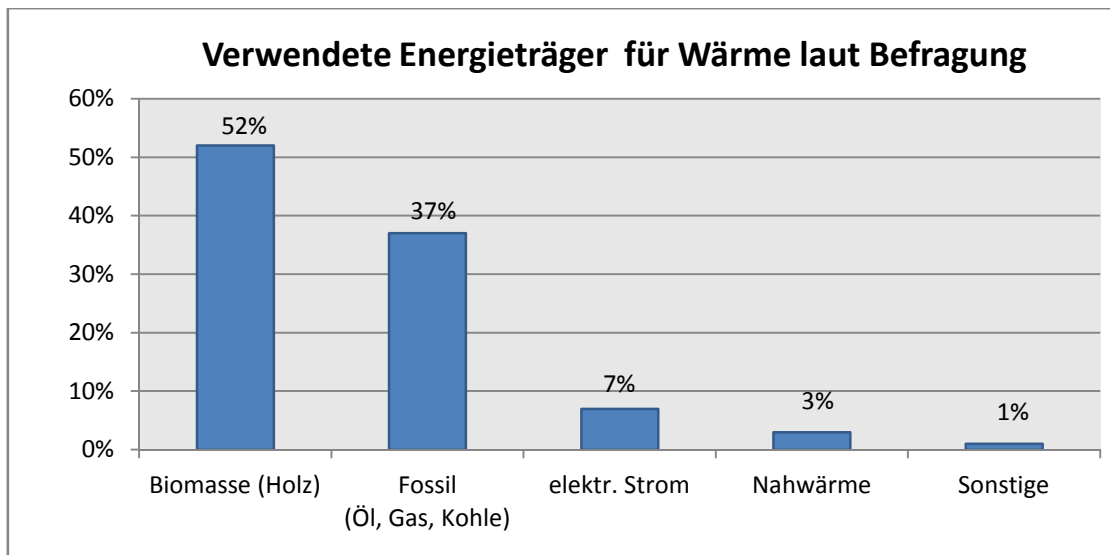
Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen der Probezählung 2006, so stellt man bei Einfamilienhäusern einen Zuwachs von 1.363 Gebäuden (+5,10%) und bei Mehrfamilienhäusern einen Zuwachs von 488 Gebäuden (+16,87%) fest. Die Einwohnerzahlen der Vulkanlandgemeinden stiegen im selben Zeitraum hingegen gerade mal um 0,11%. Dies sei nur der Form halber erwähnt, um zu zeigen, dass man von einer Veränderung der Bevölkerungszahl nicht unbedingt auf eine Veränderung der Wohngebäudeanzahl schließen kann.

Was die derzeit im Vulkanland in der Hausenergieversorgung verwendeten Heizsysteme und Energieträger betrifft, so stammen die genauesten Daten aus dem Jahr 2005. Vom Abfallwirtschaftsverband Radkersburg und dem Steirischen Vulkanland wurden damals, im Rahmen des INTERREG IIIA Projektes „*EnergieWirtschaft Radkersburg*“, ca. 8.000 Fragebögen an Landwirte, Gewerbetreibende und Privathaushalte der Pilotregion Radkersburg-West<sup>13</sup> verschickt. Erfragt wurden neben Stromverbrauch, Mobilitätsverhalten und Daten zu den jeweiligen Gebäuden selbst (Dämmung, Alter etc.) auch die verwendeten Heizsysteme und Energieträger. Die Auswertung der letztendlich ca. 1.500 ausgefüllten Fragebögen im Bereich „Wohnungen bzw. Wohngebiete“ (vgl. AWW RADKERSBURG et al. 2006; S.11) wird in Abbildung 14 dargestellt.

---

<sup>12</sup> Die Statistik führt Einfamilien- und Zweifamilienhäuser zusammen auf. Rechnerisch kann jedoch der Anteil der Einfamilienhäuser ermittelt werden (siehe Anhang).

<sup>13</sup> Siehe Kapitel 3.2: *Energievision 2025*.



**Abbildung 14: Verwendete Energieträger für Wärme laut Befragung.**  
Quelle: Eigene Erstellung nach: AWV RADKERSBURG et al. 2006.

Da die Pilotregion im Wesentlichen die gleichen Charakteristika wie alle anderen Regionen des Vulkanlandes aufweist, kann man die Ergebnisse der Befragung auf das gesamte Vulkanland übertragen, wobei man Folgendes erkennt:

Am weitesten verbreitet sind Biomasse-Heizungen (Pellets, Hackschnitzel, Stückgut etc.), gefolgt von den fossilen Energieträgern Öl, Gas und Kohle. Der Rest der Haushalte wird entweder per Nahwärme versorgt oder besitzt eine Stromheizung.

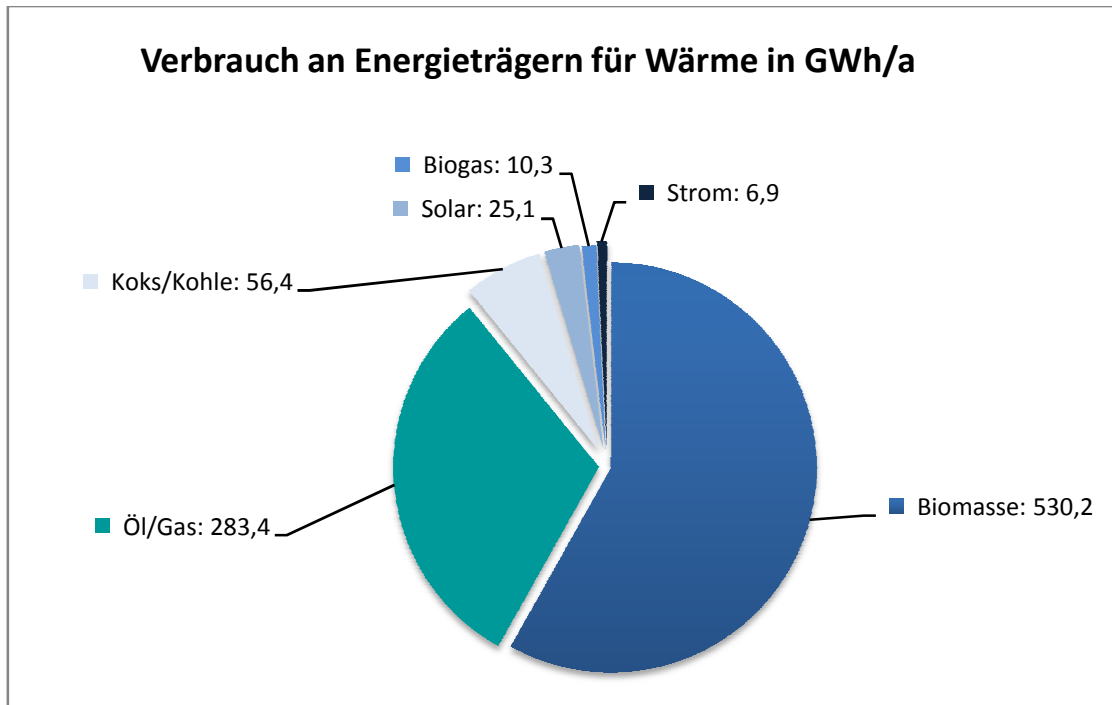
Der Durchschnittsjahresverbrauch eines Haushalts lag laut Angaben von Ing. Karl Puchas von der *Lokalen Energieagentur* in Auersbach, welcher für die Auswertung der Befragung mitverantwortlich war, bei 3.639 kWh an elektrischer Energie und 36.794 kWh an thermischer Energie.

### 3.3.2. Energieverbrauch

Im Zusammenhang mit der Befragung wurde auch das Verbrauchsmuster der Energieträger im Vulkanland ermittelt. Im Bereich Haushalte betrug der Gesamtbedarf an Wärme und Strom im Jahr 2005 1.017,4 GWh, was 35,29% des gesamten Energieverbrauchs im Vulkanland von 2.883 GWh entspricht.

Die Abbildung 15 zeigt den Gesamtverbrauch an Energie für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in den Haushalten, aufgegliedert nach den verschiedenen Energieträgern. Die Aufteilung ähnelt der von Abbildung 14, wie

auch dort macht Biomasse mit 530,2 GWh mehr als die Hälfte des Verbrauches von insgesamt 912,3 GWh aus, gefolgt von Öl und Gas mit 283,4 GWh. Der restliche Verbrauch von 98,7 GWh geht auf Koks/Kohle, Solarenergie, Biogas und Strom zurück.



**Abbildung 15: Verbrauch an Energieträgern 2005 in GWh.**  
Quelle: Eigene Erstellung nach: AWV RADKERSBURG 2006.

Was die Deckung des Bedarfs an elektrischen Strom betrifft, zeigt sich ein eindeutiges Bild: Über 95% des Strombedarfs werden über das Elektrizitätsnetz mit zum größten Teil außerhalb der Region produziertem Strom gedeckt. Die restliche Stromproduktion benutzt Biogas als Energieträger. (vgl. AWV RADKERSBURG 2006)

In Zusammenhang mit den Wohngebäuden im Vulkanland fällt auf, dass, rechnet man wieder die Ergebnisse der Befragung hoch, knapp 70% aller Wohngebäude älter als 30 Jahre sind (Baujahr 1980 oder früher), wobei ein Großteil dieser Gebäude bereits einmal renoviert wurde. Was Wärmedämmmaßnahmen angeht, kann man der Region noch einen gewissen Nachholbedarf zuschreiben, da beispielsweise nur 27% angaben, über wärmedämmte Außenmauern zu verfügen (vgl. AWV RADKERSBURG et al. 2006; S.5f).

## 4. Einsatz in Einfamilienhäusern

### 4.1. Dezentrale Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen

Brennstoffzellen können in Form eines Brennstoffzellen-Heizgerätes Strom und Wärme für die Versorgung eines Einfamilienhauses liefern. Die erzeugte Wärmeenergie kann dabei auf einen Heizkreislauf übertragen und/oder für die Warmwassererzeugung eingesetzt werden. Der erzeugte Strom fließt in das Hausstromnetz oder wird bei geringem Bedarf in das allgemeine Stromnetz eingespeist.

In der Praxis ist das Brennstoffzellen-Heizgerät meist nicht der einzige Nutzenergielieferant für das Versorgungsobjekt, vielmehr ist die Brennstoffzelle in ein Energieversorgungssystem eingebunden. Im Grunde setzt sich dieses Energiesystem aus folgenden Komponenten zusammen: Einem Brennstoffzellen-Heizgerät, einem Anschluss ans Strom- und Gasnetz für den Betrieb der Brennstoffzelle und einem Zusatzheizgerät, welches in manchen Fällen in das Brennstoffzellen-Heizgerät integriert ist.

### 4.2. Technische Anforderungen an Brennstoffzellen-Energiesysteme

Die primäre Anforderung an ein jedes (Gesamt-)Hausenergiesystem<sup>14</sup> besteht darin, Strom und Wärme an das zu versorgende Objekt zu liefern. Somit liegt auch die oberste Aufgabe eines Brennstoffzellen-Hausenergiesystems für Einfamilienhäuser darin, die Deckung des Bedarfes des Haushalts an Strom und Wärme gewährleisten zu können.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass Stromverbrauch und Wärmebedarf von Haus zu Haus unterschiedlich sind. Der Stromverbrauch hängt dabei von der Anzahl der Personen im Haushalt, deren Nutzungsverhalten sowie der Ausstattung bezüglich elektrischer Geräte ab. Im Unterschied dazu wird der Wärmebedarf

---

<sup>14</sup> Mit Hausenergiesystem ist hier die Gesamtheit aller Strom- und Wärmelieferanten eines Haushalts gemeint. Anschlüsse an ein Strom- oder Fernwärmenetz sind miteinbegriffen.

hauptsächlich vom Gebäudebestand und vom Warmwasser-Nutzungsverhalten der Bewohner beeinflusst. (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.54f)

Um den ungefähren Verbrauch von Einfamilienhäusern trotzdem bestimmen zu können, kann man das Lastprofil eines sogenannten „Standard-Einfamilienhauses“ heranziehen, wie es Abbildung 16 zeigt. Da der Tagesverbrauch stärker vom Wochentag als von der Jahreszeit abhängt, wird dort nur zwischen Werktag, Samstag und Sonntag unterschieden, wobei sich alle drei Kurven auf die Übergangszeit beziehen.

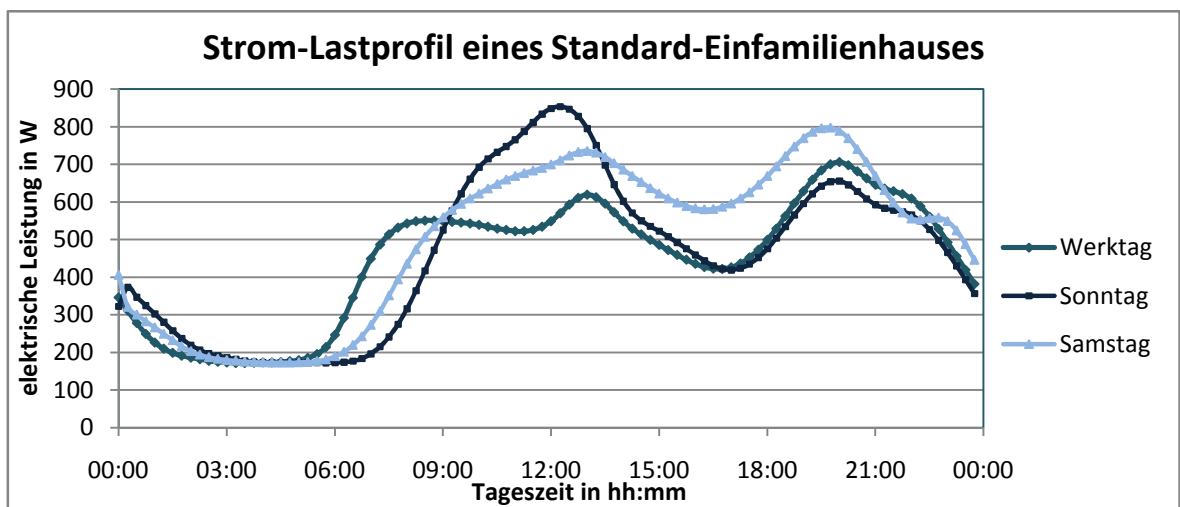


Abbildung 16: Strom-Lastprofil eines Standard-Einfamilienhauses.  
Quelle: Eigene Erstellung nach: A&B 2010.

Man sieht, dass die maximale Last sonntags zur Mittagszeit auftritt und bei etwa 850 Watt liegt. Dabei wurde angenommen, dass der Jahresverbrauch eines „Standard-Einfamilienhauses“ bei 4.000 kWh/a liegt, was den Angaben von Ing. Karl Puchas von der *Lokalen Energieagentur Auersbach* (LEA) entspricht.

Zu beachten ist jedoch, dass in einem Lastprofil kurzzeitige Lastspitzen aufgrund der Mittelung in (meist) 96 Viertelstundenwerte nicht aufscheinen. Da solche Spitzen in der Realität trotzdem abgedeckt werden müssen, darf man sie bei der Konzeption des Brennstoffzellen-Energiesystems nicht außer Acht lassen (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.57).

Was den Wärmebedarf betrifft, so lässt sich dieser ebenfalls schwer beziffern, da er stark von der Größe des Haushaltes und der Warmwassernutzung abhängt. Auch in diesem Fall hilft wieder der Blick auf ein Standard-Lastprofil, wie es Abbil-

Abbildung 17 zeigt. Der Einfachheit halber handelt es sich dabei um ein Standard-Gas-Lastprofil. Da der Energieträger Erdgas laut dem Strom- und Gastagebuch 2008 der Statistik Austria (vgl. STATISTIK AUSTRIA 2009; S.33) von 93% der erfassten Haushalte mit Gasanschluss zum Heizen und von 82% zur Warmwasseraufbereitung genutzt wird, kann man von dem im Standard-Lastprofil angegebenen Verbrauch an Gas näherungsweise auf den Wärmebedarf schließen.

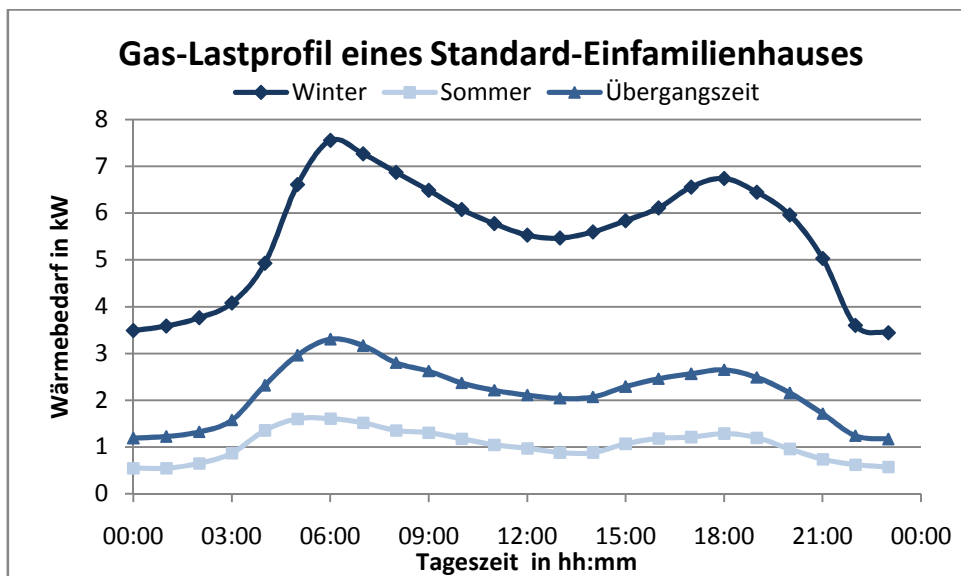


Abbildung 17: Gas-Lastprofil eines Standard-Einfamilienhauses.  
Quelle: Eigene Erstellung nach: A&B 2010 bzw. APCS 2010

Im vorliegenden Fall erhält man einen maximalen Wärmebedarf von etwa  $8 \text{ kW}_{\text{th}}$ , welcher erwartungsgemäß im Winter erreicht wird.

Für die Konzeption des Brennstoffzellen-Energiesystems und insbesondere für die Dimensionierung des Brennstoffzellen-Heizgeräts spielt jedoch neben dem Energiebedarf des zu versorgenden Objekts vor allem das Betriebsführungskonzept eine entscheidende Rolle.

Im Allgemeinen unterscheidet man hierbei zwischen 3 verschiedenen Auslegungsarten (vgl. DROSTE FRANKE 2009; S.76), nämlich:

- thermisch (= wärmegeführt)
- elektrisch (= stromgeführt)
- netzgeführt

Bei ersterer wird das Brennstoffzellen-Heizgerät so dimensioniert und betrieben, dass der Bedarf an Wärmeenergie bzw. der davon zur Warmwassererzeugung

benötigte Teil gedeckt wird. Etwaige Stromüberschüsse werden in das elektrische Netz rückgespeist.

Eine elektrische Auslegung hingegen zielt laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.76) darauf ab, das Brennstoffzellen-Heizgerät so zu konzipieren, dass es die Strom-Grundlast eines Haushaltes abzudecken vermag.

Die dritte Auslegungsart basiert auf dem Zusammenschließen mehrerer Brennstoffzellen-Heizgeräte zu einem sogenannten „Virtuellen Kraftwerk“, mit dem Ziel, in größerem Maßstab Strom dezentral zu erzeugen. Die erzeugte elektrische Energie der einzelnen, auf den thermischen Bedarf der jeweiligen Versorgungsobjekte ausgelegten Systeme wird dabei vollständig ins Stromnetz eingespeist.

Die Wahl der Betriebsführungsart (= Auslegung) liegt beim Benutzer, jede bringt Vorteile und auch Nachteile mit sich. Eine stromgeführte Betriebsweise beispielsweise führt im Sommer zu unnötig viel Wärmeproduktion und macht für die kalte Jahreszeit ein Zusatzbrenngerät erforderlich, da ohne dieses der Bedarf nicht gedeckt wäre. Auf Raumwärmeerzeugung ausgelegte Brennstoffzellen-Systeme wiederum liefern im Winter zu viel und im Sommer zu wenig elektrischen Strom, was unter Aspekten der Energieeffizienz eher zu vermeiden ist.

Eine weitere Anforderung, die ein potentielles Energiesystem erfüllen muss, besteht in der Verfügbarkeit. Die Versorgung sollte, wie bereits oben erwähnt, ständig bzw. auf Abruf gewährleistet sein. Laut DROSTE-FRANKE 2009 (S.58f) sollte das System zudem kurze Startzeiten aufweisen und die Fähigkeit haben, schnellen Lastwechseln folgen zu können.

Neben der Verfügbarkeit spielt auch die Lebensdauer des Energiesystems eine wichtige Rolle, da die Versorgung des Wohngebäudes über viele Jahre hinweg sichergestellt sein muss. Auf Brennstoffzellen-Heizgeräte bezogen wird von DROSTE-FRANKE 2009 (S.73) diesbezüglich eine Lebensdauer der Brennstoffzellen-Stacks von mindestens 40.000 Betriebsstunden bzw. fünf Jahren gefordert, was jedoch verglichen mit den Lebensdauern von konventionellen Energiesystemen trotzdem recht gering ist.

Da Einfamilienhäuser in der Regel nämlich viel länger bewohnt werden, stellt sich, will man die Energieversorgung über den ganzen Nutzungszeitraum hinweg über

ein Brennstoffzellen-Heizgerät abwickeln, die Frage nach der Austauschbarkeit der Brennstoffzellen-Stacks. Je leichter sich diese auswechseln lassen, desto weniger Umstände werden dem Benutzer bereitet, was die Akzeptanz der Technologie fördert. Von den Herstellern sollte deswegen eine modulare Bauweise, bei der sich einzelne Komponenten einfach austauschen lassen, angestrebt werden.

Ein letzter, jedoch sehr wichtiger Punkt besteht darin, möglichst hohen Komfort für den Benutzer zu erreichen. Eine einfache Gerätesteuerung über ein übersichtliches und leicht zu verstehendes Benutzerinterface und eine geringe Fehleranfälligkeit des Systems wären das Optimum.

### 4.3. Technische Eignung von Brennstoffzellen-Heizgeräten

Mit den in Kapitel 4.2 bestimmten Anforderungen lässt sich prüfen, ob heutige Brennstoffzellen-Systeme bereits weit genug ausgereift sind um einen Einsatz in Einfamilienhäusern in technischer Hinsicht realisieren zu können. Im Fokus steht hierbei das erdgasbetriebene Gerät *Gamma 1.0* von *Baxi-Innotech*, dessen Kern aus einem PEM-Brennstoffzellen-Stack mit einer maximalen Leistungsabgabe von  $1 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $1,7 \text{ kW}_{\text{th}}$  sowie einem elektrischer Wirkungsgrad von 32% besteht. Zusätzliche Wärmeenergie liefert das integrierte Brennwertgerät, welches zwischen  $3,5 - 20 \text{ kW}_{\text{th}}$  erbringen kann, bei einem Normnutzungsgrad von 109%. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems beläuft sich laut Herstellerangaben auf ca. 96% (vgl. BAXI-INNOTECH 2010).

Anhand dieser Leistungswerte lässt sich erkennen, dass der Bedarf an Wärme und Elektrizität zur Gänze von dem Brennstoffzellen-Heizgerät gedeckt werden kann, solange etwaige Stromlastspitzen vom elektrischen Netz abgefangen werden.

An die Infrastruktur vor Ort werden die gleichen Anforderungen gestellt wie bei der Benutzung einer Gasheizung, zudem verursacht der Einbau des Geräts wegen Abmessungen von  $60 \times 60 \times 160 \text{ cm}$  kaum mehr Aufwand für den Kunden als der eines konventionellen Heizsystems. Da auch die Bedienung in punkto Benutzerfreundlichkeit mit der anderer Systeme vergleichbar ist, kann man diesem und

auch vielen anderen Brennstoffzellen-Heizgeräten im Bezug auf diese Punkte bereits eine ausreichende Reife zusprechen.

Was jedoch die Lebensdauer der Anlagen oder, genauer gesagt, die der Brennstoffzellen-Stacks betrifft, so werden die Vorgaben derzeit leider noch nicht erfüllt. Von einer angestrebten Betriebsfähigkeit der Anlagen über 40.000 h hinweg ist man noch weit entfernt: Für SOFC-Systeme liegt die längste nachgewiesene Lebensdauer bei 20.000 h, für PEMFC-Systeme beträgt sie weniger als 10.000 h (vgl. THEISS 2010). Zudem treten bereits einige Zeit vor dem Inaktiv-Werden des Stacks Degradationseffekte auf, welche die Zellspannung kontinuierlich herabsetzen, was sich negativ auf die Leistung der Brennstoffzelle auswirkt (vgl. LEHNERT 2004; S.94).

Aufgrund der obigen Mängel bei diesem für Hausenergieversorgungssysteme sehr wichtigen Aspekt kann man Brennstoffzellen-Heizgeräten insgesamt betrachtet noch nicht zur Gänze die für eine Markteinführung nötige technische Reife konstatieren.

#### 4.4. Wirtschaftlichkeit

Da letztlich die Akzeptanz seitens der Verbraucher den Erfolg einer Technologie am Markt entscheidet und diese zu einem Gutteil eine Frage der anfallenden Kosten ist, muss den wirtschaftlichen Belangen bei der Bewertung der Realisierbarkeit mindestens ebenso viel Beachtung geschenkt werden wie den technischen Aspekten. Im Fokus stehen dabei der beim Kauf zu tragen kommende Anschaffungspreis und die während des Betriebs anfallenden Brennstoffkosten.

Ganz allgemein gilt, dass die Neuanschaffung bzw. Umstellung eines Energiesystems für den Verbraucher nur dann attraktiv ist, wenn neben Einsparungen an Emissionen unterm Strich auch ein finanzieller Vorteil daraus entsteht. Fallen beispielsweise die Investitionskosten bei einem System höher aus als bei einer Vergleichstechnologie, so ist ein Umstieg vom wirtschaftlichen Standpunkt aus nur dann sinnvoll, wenn die Betriebskosten dafür im Vergleich geringer sind und sich die Anlage mit der Zeit amortisieren kann.

Um die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen im Speziellen behandeln zu können, soll nun wieder der Vergleich zwischen dem bereits bekannten Modell *Gamma 1.0* von *Baxi-Innotech* und einem konventionellen Heizgerät, konkret einem Gas-Brennwertkessel von *Vaillant*, stattfinden, wobei untersucht wird, welche der beiden Optionen die bessere Kostenbilanz mit sich bringt.

Der erste Punkt, die Gegenüberstellung der jeweiligen Investitionskosten, fällt klar zugunsten des konventionellen Gerätes aus, denn dessen Kaufpreis von 4447,20 € ist um mehr als 6500 € niedriger als die angenommenen Anschaffungskosten des Brennstoffzellen-Heizgerätes von ca. 11.000 €. Zu diesen sei noch gesagt, dass es sich dabei um einen in DROSTE-FRANKE 2009 (S.72) festgehaltenen Schätzwert für die spezifischen Kosten von Brennstoffzellen-Heizgeräten handelt, da das Gerät *Gamma 1.0* derzeit noch nicht am Markt erhältlich ist und seitens des Herstellers keinerlei Angaben zu den voraussichtlichen Preisen/Produktionskosten eingeholt werden konnten.

Was den zweiten Betrachtungspunkt, die Betriebskosten, angeht, schneidet das Brennstoffzellen-System hingegen besser ab als das Vergleichsgerät. Der Vorteil erwächst sich dabei daraus, dass vom Brennstoffzellen-Heizgerät über das Jahr betrachtet mehr elektrische Energie produziert wird als man für die Deckung des Bedarfes benötigt. Der Erlös für die Einspeisung dieses Stromüberschusses sorgt zusammen mit den vermiedenen Kosten für den Bezug elektrischer Energie aus dem Stromnetz für eine erhebliche Ersparnis, die auch durch den höheren Gasverbrauch des Brennstoffzellen-Heizgerätes kaum geschmälert wird.

So ergibt sich beispielsweise für die bereits erwähnte Versorgungsaufgabe „Standard-Einfamilienhaus“<sup>15</sup> unter Annahme eines Strompreises von 17 Cent/kWh<sub>el</sub> und eines Gaspreises von 4,28 Cent/kWh<sub>th</sub> (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.91f) eine Einsparung von über 700 € bzw. 17% der Gesamtbetriebskosten. Der für den Gasverbrauch entscheidende thermische Nutzungsgrad wurde dabei für den Gas-Brennwertkessel mit 90% und für das Brennstoffzellen-Heizgerät mit 80% angenommen.

---

<sup>15</sup> Für Näheres siehe Kapitel 4.2: *Technische Anforderungen an Brennstoffzellen-Energiesysteme*

In der Kostenbilanz werden nun die beiden obigen Punkte zusammengefügt, denn sie errechnet sich aus den jeweiligen Investitionssummen plus den Jahresbetriebskosten mal der Betriebsdauer. Die Option, deren Kostenbilanz für eine bestimmte Betriebsdauer einen niedrigeren Wert aufweist, ist dabei die finanziell günstigere. Dabei sollte klar sein, dass für den häufigen Fall, wenn das eine System teurer in der Anschaffung, das andere jedoch höhere Betriebskosten aufweist, ersteres System ab einem gewissen Zeitpunkt insgesamt finanziell besser abschneidet als sein Konkurrenzsystem. Diese Amortisierungsdauer errechnet sich am einfachsten, indem man die Differenz der Anschaffungspreise durch den Unterschied zwischen den jährlichen Betriebskosten teilt.

Für das betrachtete Gerät *Gamma 1.0* bedeutet dies, dass es nach einer Betriebsspanne von ca. 9 Jahren theoretisch kostengünstiger als das Vergleichssystem arbeiten würde.

In der Praxis hingegen kann dieser finanzielle Vorteil vom derzeitigen Standpunkt aus niemals erreicht werden, da die Lebensdauern einzelner Brennstoffzellengeräte dafür schlicht zu niedrig sind. Weder die bereits erwiesenen 10.000 noch die für die Zukunft angestrebten 40.000 Betriebsstunden Lebensdauer von Brennstoffzellen-Heizgeräten kommen nämlich auch nur in die Nähe der für die Amortisierung nötigen Betriebsdauer von 72.000 h (= 9 Jahre bei 8.000 h/a).

Demzufolge muss man zu der Erkenntnis kommen, dass Brennstoffzellen-Heizgeräte in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit konventionellen Hausenergiesystemen deutlich unterlegen sind. Vom derzeitigen Stand der Dinge aus spricht deshalb finanziell gesehen nichts für einen Einsatz derselben.

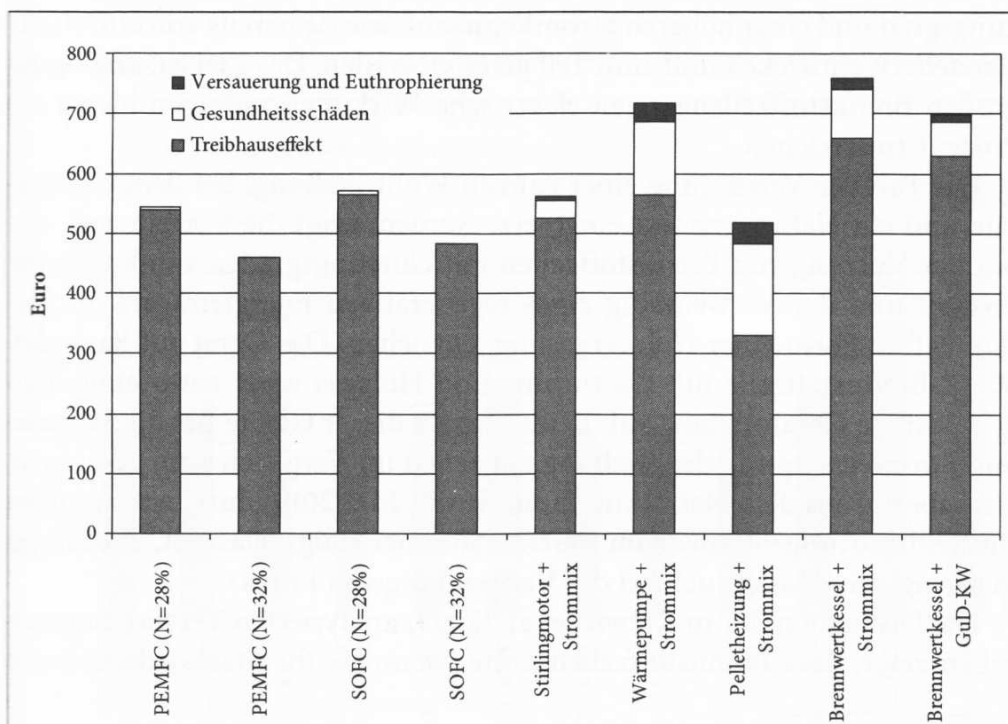
## 4.5. Umweltaspekte

Neben der Wirtschaftlichkeit steht bei Energieumwandlungsprozessen auch die Umweltfreundlichkeit im Fokus der Betrachtung, denn angesichts der nicht unbegrenzt vorhandenen ökologischen Ressourcen unseres Planeten können nur Technologien, welche die Umwelt möglichst wenig belasten, als zukunftsfähig angesehen werden.

Zur Beurteilung der Umweltfreundlichkeit einer Technologie wird deshalb versucht, alle Faktoren, die Auswirkungen auf die Natur oder den Menschen haben, zu be-

rücksichtigen. Dabei muss man neben den während des Betriebs anfallenden Schadstoffemissionen auch jene mit einbeziehen, die bei der Produktion bzw. Entsorgung der zur Energieumwandlung nötigen Geräte entstehen. Der Einfachheit und Vergleichbarkeit halber werden all jene Prozesse unter dem Begriff „externe Kosten“ zusammengefasst und mit einem Geldwert beziffert.

Eine ausführliche Betrachtung der externen Kosten von Brennstoffzellen-Heizgeräten im Vergleich zu anderen Konkurrenztechnologien wird von DROSTE-FRANKE 2009 vorgenommen (siehe DROSTE-FRANKE 2009; S.103f). Es werden dabei die Ergebnisse einer von KREWITT et al. 2004 durchgeführten Studie für verschiedene Versorgungsaufgaben wiedergegeben. Die Ergebnisse für die Versorgung eines Einfamilienhauses werden von der Abbildung 18 gezeigt. Welche Bewertungskriterien bei der Erstellung der Daten zum Einsatz kamen, lässt sich in DORSTE-FRANKE 2009 (S.103f) nachlesen, jedoch reicht es an dieser Stelle zu wissen, dass die verschiedenen Faktoren in den drei Kategorien Treibhauseffekt, Gesundheitsschäden sowie Versauerung und Euthrophierung<sup>16</sup> zusammengefasst wurden.



**Abbildung 18: Externe Kosten für die Versorgung eines Einfamilienhauses.**  
Quelle: DROSTE-FRANKE 2009.

<sup>16</sup> Euthrophierung bedeutet die Anreicherung von Nährstoffen in einem Ökosystem, gemeinhin als „Überdüngung“ bezeichnet.

Augenscheinlich an Abbildung 18 ist, dass die PEMFC und die SOFC, geht man von einem Wirkungsgrad von 32% aus, weniger externe Kosten verursachen als die restlichen Varianten. Einzig allein die Option „Pelletheizung + Strommix“ weist in einem Teilbereich, dem der für den Treibhauseffekt relevanten Faktoren, eine geringere Umweltschädlichkeit auf, was damit begründet ist, dass dort, im Gegensatz zum Erdgas bei den Brennstoffzellen, ein CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger zum Einsatz kommt, nämlich Holz. Nimmt man im Zuge der Berechnung für PEMFC und SOFC jedoch regenerativ erzeugtes Biogas als Brennstoff an, so verbessert sich dadurch die CO<sub>2</sub>-Bilanz und der Unterschied zur obigen Variante verkleinert sich. Überhaupt besteht bei Brennstoffzellen die einzige Möglichkeit für eine weitere Minimierung der externen Kosten im Senken der klimaschädlichen Emissionen, die bei Betrieb und Herstellung entstehen, da, wie man an der Grafik erkennen kann, auf den anderen Gebieten schon jetzt nahezu keine Schäden für die Umwelt entstehen.

Zusätzlich zu der in DROSTE-FRANKE getroffenen Bewertung der verschiedenen Optionen wurde für diese Arbeit mit dem Programm *GEMIS 4.5* des *Öko-Instituts* (= Institut für angewandte Ökologie) eigenständig versucht, aufbauend auf bereits im Programm vorhandenen Daten ein eigenes Vergleichsszenario zu erstellen (vgl. ÖKO-INSTITUT 2006). Konkret fand dabei die Gegenüberstellung des im Kapitel 4.3 *Technische Eignung von Brennstoffzellen-Heizgeräten* näher erläuterten Brennstoffzellen-Heizgeräts *Gamma 1.0* mit einer konventionellen Einfamilienhaus-Gasheizung<sup>17</sup> statt. Für den in *GEMIS* (= Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme), eingegebenen „Nur-Energie“-Vergleich wurde dabei angenommen, dass der zu versorgende Haushalt einen maximalen Bedarf von 0,85 kW<sub>el</sub> bzw. 8 kW<sub>th</sub> aufweist und einen Jahresverbrauch von 4.000 kWh<sub>el</sub> und 20.000 kWh<sub>th</sub> besitzt.

Das Brennstoffzellen-Heizgerät ist darauf ausgelegt, den gesamten Warmwasser- sowie einen Teil des Heizwärmebedarfs des Hauses zu decken, es wird also wärmegeführt betrieben. Die zusätzlich benötigte Raumwärme stellt ein integriertes Brennwert-Heizgerät bereit.

---

<sup>17</sup> Für die Berechnung wurden die Werte des Gas-Brennwertkessels *ecoVIT* von *Vaillant* benutzt.

Bei der zweiten Variante übernimmt die Gasheizung die gesamte Wärmeerzeugung, der Strombedarf wird vom Netz gedeckt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Leistungsabgabe der Brennwärtheizung sehr gut modulierbar ist und somit auch im Sommer zwecks Warmwassererzeugung betrieben werden kann, ohne dass ein Wärmeüberschuss entsteht.

Nimmt man für beide Optionen fossiles Erdgas als Brennstoff an, so erbringt der Vergleich in Bezug auf die durch den Betrieb verursachte Umweltbelastung für den Betrachtungsrahmen von 1 Jahr folgende Resultate:

Die Luftschadstoffemissionen des Brennstoffzellen-Variante liegen, auf  $\text{SO}_2$ -Äquivalente umgerechnet, um 52% unter denen der Kombination aus Gasheizung und Netzstrom. Beispielsweise entstehen um 3,2 kg weniger Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), um 1,6 kg weniger Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) und um ca. 0,9 kg weniger Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ).

Was den Ausstoß an Treibhausgasen belangt, so fällt der Unterschied zwischen den beiden Versorgungsarten, auf  $\text{CO}_2$ -Äquivalente bezogen, mit etwa 35% zwar geringer aus, stellt jedoch nichtsdestotrotz eine beachtliche Differenz dar, aus der man ein großes Einsparungspotential herauslesen kann.

Setzt man nun das obige Szenario auf das Steirische Vulkanland um, kann man zeigen, welche Emissionsminderung durch die Ausstattung von Einfamilienhäusern mit Brennstoffzellen-Heizgeräten erreicht werden könnte. In Anbetracht dessen, dass Gasheizungen in der Region nur wenig verbreitet sind, beziehen sich die für das konventionelle Heizsystem verwendeten Werte bei dieser Gegenüberstellung auf eine Ölheizung, da solche Heizgeräte immerhin in über 30% der Haushalte installiert sind.

Nimmt man für die Simulation eine vollständige Umstellung aller Häuser mit Ölheizungen auf Brennstoffzellen-Heizgeräte an, so ergibt sich, bezieht man auch die bei der Herstellung entstehenden Emissionen mit ein, in Summe eine Verminderung der Emissionen um fast 43.000 Tonnen  $\text{CO}_2$ -Äquivalent pro Jahr. Selbst bei einer, aufgrund der hohen Anschaffungskosten realistischeren Umstellungsrate von nur etwa 5% aller Vulkanland-Einfamilienhäuser, in etwa also 1.400 Wohnobjekte, würde der Treibhausgas-Ausstoß immerhin noch um 7.000 Tonnen  $\text{CO}_2$ -Äquivalent pro Jahr verringert werden.

## 4.6. Problem der Brennstoffbeschaffung

Eine weitere Grundvoraussetzung für die Realisierbarkeit von Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung besteht in der Verfügbarkeit des für die Energieumwandlung nötigen Brennstoffes. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um Wasserstoff, jedoch sind nahezu alle Brennstoffzellen in der Lage auch Kohlenwasserstoffe und andere wasserstoffhaltige Gase umzusetzen. Dies schaffen sie entweder mithilfe eines vorgeschalteten Reformationsprozesses oder über die interne Reformation.

Vom Umweltgedanken her wäre jedoch eigentlich ein reiner Wasserstoffbetrieb am erstrebenswertesten, entstehen dabei ja keinerlei Treibhausgase bzw. Schadstoffe, sondern nur reines Wasser. Im Prinzip stimmt diese Überlegung, doch in der Praxis muss man erkennen, dass die Umweltfreundlichkeit einer Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff von der Herkunft des Wasserstoffes abhängt. Da dieser Energieträger in reiner Form auf der Erde beinahe nicht vorkommt, muss er aus anderen Stoffen gewonnen werden, was oft mit der Emission von Schadstoffen/Treibhausgasen verbunden ist.

Ein Beispiel hierfür ist die derzeit weit verbreitete Wasserstoffgewinnung aus fossilem Erdgas, bei der gleich viel  $\text{CO}_2$  wie bei der Verbrennung des Energieträgers frei wird. Auch bei Brennstoffzellen-Heizgeräten dient momentan hauptsächlich fossiles Erdgas als Ausgangsstoff für die Energiegewinnung.

Im Zuge der geforderten Nachhaltigkeit der Energieversorgung per Brennstoffzellen-Systemen ist es somit von großer Bedeutung, dass es bei der Brennstoffbeschaffung weder zu Umweltschäden noch zu einer Abhängigkeit von anderen Staaten kommt, wie es derzeit bei Erdöl bzw. Erdgas der Fall ist. Gefordert sind also umweltfreundliche Methoden, die sich lokal und unter Vermeidung langer Transportwege umsetzen lassen.

Die folgende Aufzählung führt einige der vielversprechendsten Möglichkeiten auf:

- Elektrolyse von Wasser mit Ökostrom
- Vergärung von Biomasse zu Biogas
- Biomassevergasung mit Methanierung
- Biomassevergasung ohne Methanierung

Bei der Wasserstoffelektrolyse wird durch Gleichstrom Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt (vgl. BMWA 2005; S.15). Der dazu benötigte Strom stammt aus einer regenerativen Erzeugung (Photovoltaik, Wind-, Wasserkraft etc.), sodass der Vorgang CO<sub>2</sub>-neutral abläuft.

Die Biomassevergärung, die klassische Art der Biogasproduktion, basiert auf der Umwandlung von Gülle oder anderen organischen Stoffen durch methanbildende Bakterien in einem Fermenter unter Luftabschluss. Das entstehende Biogas besitzt, wenn es gereinigt wird, Erdgasqualität.

Die beiden letzten Methoden basieren auf demselben Prinzip, nämlich der Umsetzung von fester Biomasse in ein nutzbares Produktgas. Im Falle der Biomasse-Wasserdampf-Vergasung wird dabei Holz mit 850 °C heißem Wasserdampf in ein Gemisch aus H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> umgewandelt. Aus diesem kann entweder direkt Wasserstoff gewonnen (H<sub>2</sub>-Anteil ungefähr 50%) oder per Methanierung samt Abscheidung von CO<sub>2</sub> reines Biogas erzeugt werden (vgl. AICHERING et al. 2010).

Was die Transportwege angeht, erkennt man hierbei schnell, dass auch in Zukunft an zentralen Großanlagen für die Brennstoffherzeugung kaum ein Weg vorbeiführen wird, da die meisten oben genannten Prozesse in kleinerem Maßstab nicht oder nur wenig effizient ablaufen können. Dem Brennstofftransport kommt also weiterhin eine zentrale Rolle zu, wobei es dabei im Grunde um die Verteilung von Wasserstoff bzw. Erdgas geht.

Beide Gase lassen sich in Pipelines transportieren, jedoch ist der Aufwand im Falle von Wasserstoff höher. Das bestehende Erdgasnetz könnte zwar genutzt werden, doch dafür wären Adaptionen notwendig (vgl. BMWA 2005; S.29f). Einfacher ist es deshalb, Biogas zu erzeugen und in die bereits vorhandene Verteilungsinfrastruktur einzuspeisen.

In Bezug auf die zukünftige Versorgung des Steirischen Vulkanlandes bietet sich die Technik der Biomassevergasung an, mit der aus Holz synthetisches Biogas hergestellt werden kann. Naheliegend ist es vor allem deswegen, weil die Region über einen hohen Waldanteil sowie viele häufig ungenutzte Hangflächen verfügt,

welche hervorragend für den Anbau von Energiepflanzen geeignet sind. Auch gibt es vom Steirischen Vulkanland selbst bereits das Bestreben, diese brachliegenden Potentiale zu nutzen, Stichpunkt „Landmanagement“.

Aus dem *KEK-Energie RadkersburgWest* (vgl. KROTSCHECK, PUCHAS 2007; S.14) lässt sich entnehmen, dass, hochgerechnet auf das Steirische Vulkanland, insgesamt 48.600 ha Forst und 12.380 ha Hanglagen mit einer Neigung von mehr als 8,7% für die Biomassegewinnung zur Verfügung stehen. Die Nahrungsmittelproduktion wird dabei in keiner Weise gefährdet, da für diese genügend Anbaufläche in den Tallagen reserviert bleibt.

Um nun alle Einfamilienhäuser im Vulkanland versorgen zu können, in Summe 28.066 Gebäude, muss bei einem Jahresgasbedarf von etwa 5.100 Nm<sup>3</sup> pro Haushalt eine Biogasmenge von insgesamt ca.144 Mio Nm<sup>3</sup> bereitgestellt werden. Für die Erzeugung dieser Menge in Biovergasanlagen sind wiederum 433.000 t atro (absolut trocken) Biomasse in Form von Holz nötig (vgl. EEE GÜSSING 2010). Bei optimaler Nutzung der vorhandenen Flächen, d.h. Durchforstung des Waldbestandes und Anbau von Energiehölzern im Kurzumtrieb auf den Hanglagen, würden 37.400 ha Forstflächen und 9.600 ha Hanglagen ausreichen, um den gewünschten Biomasseertrag erwirtschaften zu können. Dies sind in etwa 77% der verfügbaren Flächen, es bliebe also noch Spielraum für die Deckung eines u. U. höheren zukünftigen Bedarfes oder eine Versorgung anderer Objekte (z.B. Mehrfamilienhäuser bzw. Gewerbe- oder Gemeindebauten) übrig. Die naturräumlichen Voraussetzungen sind also gegeben.

Ebenfalls machbar scheint die Errichtung der für die Biovergasung nötigen Anlagen. Unter der Voraussetzung, dass im Sommer überschüssig produziertes Gas in geeigneten Lagern gespeichert werden kann, um im Winter benutzt zu werden, genügen nämlich 180 Biovergaser vom Typ der in Güssing installierten Methanierungs-Demonstrationsanlage für die Deckung des Bedarfes. Die Jahresbetriebszeit der einzelnen Anlagen von je 8.000 h berücksichtigt dabei eine ausreichende Stillstandszeit für Wartung und Instandhaltung.

Der einzige wirkliche Unsicherheitsfaktor besteht auch hier in den Kosten, speziell was die Investitionskosten anbelangt. Diese können vom derzeitigen Standpunkt jedoch nicht ermittelt werden. Für die geschätzten Anschaffungskosten von 1 Mil-

lion Euro pro Anlage würde sich jedenfalls eine Gesamtinvestitionssumme von 180 Millionen Euro ergeben, was durchaus im Rahmen anderer Kraftwerksprojekte dieser Größenordnung ist.

#### 4.7. Fazit

In Anbetracht der in den vorigen Kapiteln zusammengetragenen Fakten zu technischer Ausgereiftheit, Wirtschaftlichkeit sowie Umweltfreundlichkeit, muss man zu dem Schluss kommen, dass Brennstoffzellen-Heizgeräte derzeit noch nicht für einen Einsatz in Einfamilienhäusern geeignet sind.

Dies ist vor allem wirtschaftlich begründet, denn die sehr hohen Investitionskosten verbunden mit der geringen Anlagenlebensdauer führen dazu, dass Brennstoffzellen-Energiesysteme trotz der niedrigeren Betriebskosten in finanzieller Hinsicht schlechter abschneiden als vergleichbare Konkurrenztechnologien.

In den Augen des Autors obliegt es den Herstellern und der Politik, bessere Bedingungen für den Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten zu schaffen. Die Zielsetzung für die Produzenten wäre dabei eindeutig die Erhöhung der Anlagenlebensdauer, verknüpft mit dem Herabsenken der Material- und Herstellungskosten. Zudem müsste man den Vertrieb der Brennstoffzell-Geräte und die nötige Serviceinfrastruktur (Installation, Wartung, Problembehebung) aufbauen, am besten in Zusammenarbeit mit der Politik.

Deren zusätzliche Aufgabe wäre es, Strukturen zu schaffen, welche Emissionsminderungen im Hausenergiebereich finanziell belohnen und damit den Einsatz für den Verbraucher attraktiver machen. Bewerkstelligt werden könnte dies beispielsweise durch gesetzliche Bestimmungen wie dem in Deutschland gültigen *Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG)* (vgl. DROSTE-FRANKE 2009; S.86f).

## 5. Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades einer PEM-Brennstoffzelle

Zentrale Aufgabe von Brennstoffzellen ist es, die im Wasserstoff gespeicherte chemische Energie möglichst verlustfrei in elektrischen Strom und nutzbare Wärmeenergie umzuwandeln. Das Maß für die Effizienz eines Energieumwandlungsprozesses wird Wirkungsgrad genannt und gemeinhin mit dem griechischen Buchstaben  $\eta$  abgekürzt. Er stellt dabei das Verhältnis von ausgegebener Energie zu eingeführter Energie dar.

Der Gesamtwirkungsgrad einer Brennstoffzelle lässt sich theoretisch bestimmen und liegt für den idealen Fall  $\eta_{\text{ideal}}$  bei 83,3%, wenn das Produktwasser flüssig vorliegt, bzw. bei 94,5%, wenn selbiges in Gasphase auftritt (vgl. HEINZEL et al. 2006; S.5). In der Praxis bleiben die wirklich erreichten Wirkungsgrade von Brennstoffzellen jedoch mitunter weit unter diesem Wert, was an diversen, nicht idealen, innerhalb der Brennstoffzelle ablaufenden Prozessen liegt.

Im Folgenden soll nun erklärt werden, wie man den elektrischen Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle bestimmt.

### 5.1. Untersuchte Brennstoffzelle<sup>18</sup>

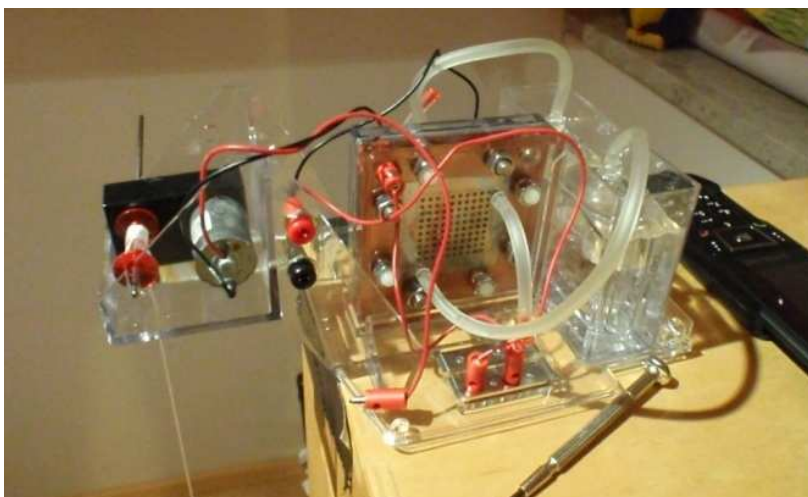


Abbildung 19: Brennstoffzelle und Elektromotor.  
Quelle: Eigenes Bildmaterial.

<sup>18</sup> Aus finanziellen und aufwandstechnischen Gründen konnten die Untersuchungen nicht an einem echten Brennstoffzellen-Heizgerät durchgeführt werden.

Die betrachtete PEM-Brennstoffzelle ist Teil eines Experimentierkastens des Spielzeugwaren-Herstellers *KOSMOS*. Sie ist dafür konzipiert, die Durchführung von Experimenten, wie zum Beispiel den Betrieb eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs, zu ermöglichen. Der für die Versuche benötigte Wasserstoff und Sauerstoff wird per Elektrolyse von der Zelle selbst erzeugt und in getrennten Kunststofftanks gespeichert. Abbildung 19 zeigt die besprochene Zelle in der dafür vorgesehenen Halterung mitsamt Gastanks und Verkabelung. Weiters zu sehen ist ein Elektromotor, der als Antrieb für das oben genannte Brennstoffzellen-Fahrzeug verwendet werden kann oder mit dem, wie es in Abbildung 19 der Fall ist, über eine Seilwinde Lasten gehoben werden können.

## 5.2. Experiment: Lastenaufzug

### 5.2.1. Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es, die von der Brennstoffzelle produzierte (= ausgegebene) Energiemenge und den dafür nötigen  $H_2$ -Verbrauch zu messen, um über das Verhältnis von produzierter Energie zu der in der benötigten  $H_2$ -Menge steckenden (= eingeführten) Energie zum Wirkungsgrad der Zelle zu gelangen.

### 5.2.2. Versuchsaufbau

Die Brennstoffzelle versorgt in diesem Experiment den in Abbildung 19 abgebildeten Elektromotor mit Strom, welcher die erhaltene elektrische Energie in mechanische Arbeit umwandelt und über eine Seilwinde eine Last nach oben zieht. Die Last besteht in diesem Fall aus mehreren zusammengebundenen Holzklötzchen, die insgesamt 100 g wiegen. Um die Hubhöhe ablesen zu können braucht man eine eigene Höhenmessskala, welche in diesem Fall von einem 50 cm langen Lineal verkörpert wird, dessen Messbereich zur besseren Erkennbarkeit mit Klebestreifen hervorgehoben wurde. Abbildung 20 zeigt eine Frontansicht des grundsätzlichen Versuchsaufbaus.

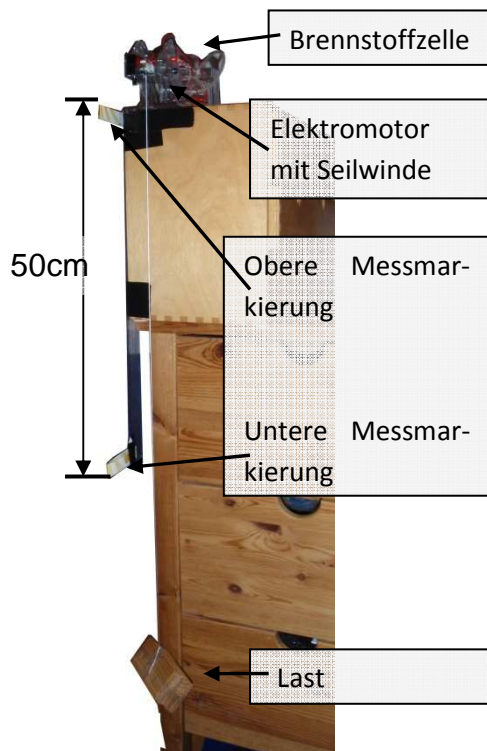


Abbildung 20: Ansicht des Versuchsaufbaus.  
Quelle: Eigenes Bildmaterial.

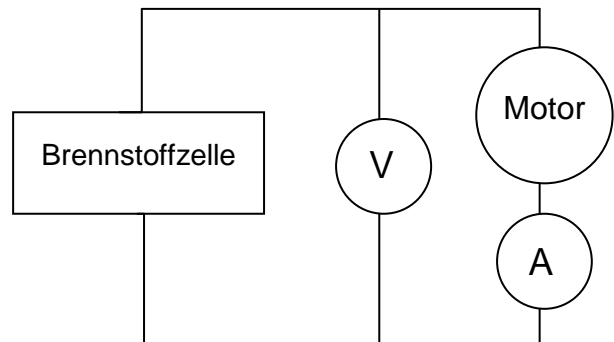


Abbildung 21: Schaltplan für den Versuch.  
Quelle: Eigene Erstellung.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Versuchsvorganges ist die Messung der am Motor herrschenden Spannung und Stromstärke, wozu ein Volt- und ein Amperemeter nötig sind.<sup>19</sup> Diese müssen gemäß des in Abbildung 21 angegebenen Schaltbildes angeschlossen werden: Das Voltmeter (V) muss parallel zum Motor geschaltet sein, das Amperemeter (A) in Serie.

Neben der Höhenmessung und der Bestimmung von Spannung und Stromstärke des Motors sollte es im Rahmen des Experiments auch möglich sein, den Verbrauch an  $H_2$  ablesen zu können, was Füllstandsmarkierungen an dem Wasserstoffbehälter nötig macht.<sup>20</sup> Bei vielen im Handel erhältlichen Brennstoffzellen(-Experimentierkästen) werden diese bereits vom Hersteller aufgedruckt oder liegen dem Bausatz als Klebefolie bei, wie im Fall der vorliegenden Brennstoffzelle. Sind die Markierungen nicht vorhanden, muss man diese durch das Einfüllen bekannter Flüssigkeitsmengen selbst erstellen.

<sup>19</sup> Konkret wurden die Messungen mit zwei Multimetern vorgenommen.

<sup>20</sup> Näheres siehe im Kapitel 5.2.3: *Versuchsablauf*.

Bevor der Start des Experiments erfolgen kann, muss erst die Brennstoffzelle ordnungsgemäß mit destilliertem Wasser gefüllt werden, es darf dabei keine Luft innerhalb der Zelle, den zuführenden Schläuchen oder den Gasbehältern verbleiben. Wurde dies sachgemäß durchgeführt, kann man mit der Elektrolyse des im Vorratsbehälter befindlichen destillierten Wassers beginnen, indem man eine Spannungsquelle (Batterie, Solarmodul etc.) an die Brennstoffzelle anschließt. Sind die H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Tanks voll, kann das Experiment beginnen.

### 5.2.3. Versuchsablauf

Der Weg zum Wirkungsgrad der Brennstoffzelle führt über den Gesamtsystemwirkungsgrad<sup>21</sup>  $\eta_{\text{Gesamt}}$  und Wirkungsgrad des Motors,  $\eta_{\text{Motor}}$ : Sind beide bekannt, so lässt sich daraus auf den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle,  $\eta_{\text{BZ}}$ , schließen, denn es gilt folgender Zusammenhang:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{BZ}} \cdot \eta_{\text{Motor}}$$

was sich zu:

$$\eta_{\text{BZ}} = \frac{\eta_{\text{Gesamt}}}{\eta_{\text{Motor}}}$$

umformen lässt.

Für die Berechnung der beiden oben erwähnten Wirkungsgrade müssen nun jeweils die Kenngrößen bestimmt werden, aus denen man eingeführte bzw. ausgegebene Energie herleiten kann.

Der Übersichtlichkeit und Einfachheit wegen wurde das Experiment in zwei Schritte gegliedert, wodurch man die beobachteten Parameter besser im Auge behalten kann.

#### *Erster Schritt: Bestimmung des Gesamtsystemwirkungsgrades*

Zu Beginn wird das Gewicht bis zum unteren Ende der Messskala herabgelassen, der Stromkreis ist dabei noch nicht geschlossen.

---

<sup>21</sup>Bei dem Gesamtsystem werden Brennstoffzelle und Motor als Einheit aufgefasst. Der Wirkungsgrad gibt in diesem Zusammenhang die Effizienz der Umwandlung von chemischer Energie in die vom Motor geleistete mechanische Energie an.

Dann schließt man den Stromkreis, wobei man vorher kurz überprüfen sollte, in welche Richtung der Motor bei der vorgenommenen Verkabelung das Gewicht bewegt. Für den Fall, dass die Last statt hochgezogen herabgelassen wird, vertauscht man einfach die Kontakte an der Brennstoffzelle.

Der nächste Schritt besteht darin, der Aufwärtsbewegung des Gewichtes zu folgen und den Stromkreis genau dann zu unterbrechen, wenn es das obere Ende des Messbereiches erreicht. Nach dem Festhalten des H<sub>2</sub>-Füllstands kann die Last wieder bis zur unteren Messmarke herabgelassen werden. Diesen Zyklus muss man nun mehrere Male wiederholen, bis eine gewisse, im Vorfeld individuell festgesetzte, Menge H<sub>2</sub> verbraucht wurde. Die zum Verbrauchen dieser Menge nötigen Anzahl an Hebevorgängen führt nun, wie in Kapitel 5.2.5: *Berechnung* und Ergebnisse erklärt, zum Gesamtsystemwirkungsgrad.

#### *Zweiter Schritt: Bestimmung des Motorenwirkungsgrades*

Die Vorgehensweise entspricht im Grunde der oben erläuterten, man lässt den Motor die Last heben und bewegt sie anschließend wieder händisch herab. Im Fokus stehen hingegen weder der Verbrauch an H<sub>2</sub> noch die gewonnene Höhe, sondern Spannung und Stromstärke des Stroms, mit dem der Motor versorgt wird, sowie die Zeit, die er hierfür benötigt. Die ersten beiden Werte kann man mit dem Volt- bzw. Amperemeter bestimmen, die Zeit misst man am besten mit einer Stoppuhr. Erfahrungsgemäß sollte man die Messung der Zeit mehrmals durchführen, da die Hebedauer, wie in 5.2.4: *Beobachtungen* ersichtlich, sich erst nach mehreren Versuchen auf einen konstanten Wert einpendelt.

#### **5.2.4. Beobachtungen**

Im Gesamten betrachtet, wurde bei den beiden Schritten Folgendes beobachtet:

- Beim 11-maligen Hochziehen der Last werden 6 ml Wasserstoff verbraucht, man erkennt zudem, dass die Anzahl der Hebevorgänge in einem linearen Verhältnis zum Wasserstoffverbrauch steht.
- Die Stromstärke des Motors beträgt 0,26 Ampere, die Spannung wurde mit 0,5 Volt gemessen. Beide Werte schwanken während der Messung leicht.
- Ein Hebevorgang dauert, nimmt man den Schnitt der 4 ähnlichsten Zeiten, ungefähr 14,4 Sekunden.

Anmerkung: Die genauen Zeiten werden in der nebenstehenden Tabelle 2 dargestellt, die zu der Berechnung der Durchschnittszeit herangezogenen Werte sind

Versuch Nr.	Dauer des Hebevorganges in Sekunden
1	18,86
2	21,19
3	26,68
4	16,2
5	<b>14,58</b>
6	<b>14,4</b>
7	<b>14,26</b>
8	<b>14,13</b>

Tabelle 2: Protokoll der Hebedauer.  
Quelle: Eigene Erstellung.

dabei fett hervorgehoben.

Vergleicht man die einzelnen Zeiten, so muss man feststellen, dass es mitunter starke Schwankungen gibt. Herrühren können diese von Messfehlern, von leicht veränderten Versuchsbedingungen<sup>22</sup> oder von grundlegenden Eigenschaften der Brennstoffzelle bzw. des Motors.

### 5.2.5. Berechnung und Ergebnisse

Ausgangspunkt für die Berechnung des Brennstoffzellen-Wirkungsgrades ist die Gleichung, die bereits in 5.2.3: *Versuchsablauf* erwähnt wurde:

$$\eta_{BZ} = \frac{\eta_{\text{Gesamt}}}{\eta_{\text{Motor}}}$$

Um ein Ergebnis zu erhalten, muss man zuerst den Gesamtsystemwirkungsgrad und Motorenwirkungsgrad berechnen. Bei ersterem geht das durch die Formel:

$$\eta_{GES} = \frac{W_{\text{Motor}}}{E_{\text{Wasserstoff}}}$$

$W_{\text{Motor}}$ , die vom Motor geleistete Arbeit, ist nichts anderes als die potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$ , die der Körper durch das Hochziehen gewinnt. Für diese gilt:

$$W_{\text{Motor}} = E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

wobei  $m$  die Masse,  $g$  die Fallbeschleunigung von  $9,81\text{m/s}^2$  und  $h$  die beim Hebevorgang gewonnene Höhe ist.

$E_{\text{Wasserstoff}}$  repräsentiert die in der verbrauchten Menge Wasserstoff gespeicherte Energie. Berechnen lässt sich diese mithilfe des oberen Heizwerts von  $\text{H}_2$ , der laut HEINZEL et al. 2006 (S.4) mit  $\Delta H_o^0 = -285,8\text{kJ/mol}$  festgesetzt ist. Das Minus gibt dabei an, dass es sich um freiwerdende Energie handelt. In der

<sup>22</sup>Bei manchen Versuchen ist das Gewicht mit einem anliegenden Kasten in Berührung gekommen, bzw. kurz an einer Kante hängen geblieben.

späteren Berechnung kommt es jedoch nur auf den Betrag der gespeicherten Energie an, weshalb das negative Vorzeichen vernachlässigt werden kann und wird. Unabhängig davon gilt:

$$E_{\text{Wasserstoff}} = \Delta H_o^0 \cdot n$$

n ist dabei die Menge des verbrauchten Wasserstoffs in Mol.

Beim Motorenwirkungsgrad wendet man im Grunde die gleiche Formel an, es gilt wieder: Wirkungsgrad ist abgegebene Energie durch eingeführte. Erstere ist logischerweise wieder die vom Motor geleistete Arbeit  $W_{\text{Motor}}$ , zweitere kann man mithilfe von Stromstärke und Spannung ermitteln. Dazu bedient man sich dem Fakt, dass Leistung gleich Energie durch Zeit, sowie Spannung mal Stromstärke darstellt. Man kann also gleichsetzen:

$$\frac{E}{t} = U \cdot I$$

woraus sich für die eingeführte Energie  $E_{\text{ein}}$  ergibt:

$$E_{\text{ein}} = U \cdot I \cdot t$$

Nachdem die Herleitung der Formeln nun klar sein sollte, kann man daran gehen, die im Experiment ermittelten Messwerte einzusetzen. Dabei muss man jedoch darauf achten, dass alle Kenngrößen auf die gleiche Anzahl an Versuchen bezogen werden, zum Beispiel auf einmaliges Hochheben. Hinweis: Betrachtet man mehrmaliges Hochziehen, so darf man keinesfalls vergessen, Werte wie die durchschnittliche Hebedauer oder die Hubhöhe mal der Anzahl der Versuche zu nehmen, so wie es in Tabelle 3 geschehen ist, welche alle Werte bezogen auf 11-maliges Hochziehen auflistet.

Beim Experiment festgestellte Kenngrößen			
m [in kg]	0,1	n [in mol] <sup>23</sup>	0,0002679
h [in m] <sup>24</sup>	5,5	U [in V]	0,5
$\Delta H_o^0$ [in kJ/mol] <sup>25</sup>	285,5	I [in A]	0,26
g [in m/s <sup>2</sup> ]	9,81	t [in s] <sup>26</sup>	158,4

Tabelle 3: Kenngrößen für die Wirkungsgradberechnung.

Quelle: Eigene Erstellung.

Auf Basis dieser Daten ergeben sich nun folgende Zwischenergebnisse:

$$W_{Motor} = m \cdot g \cdot h = 0,1 \cdot 9,81 \cdot 5,5 = \underline{5,3955 J} ,$$

$$E_{Wasserstoff} = \Delta H_o^0 \cdot n = 285,5 \cdot 0,0002679 = \underline{76,47 J} ,$$

und:  $E_{ein} = U \cdot I \cdot t = 0,5 \cdot 0,26 \cdot 158,4 = \underline{20,592 J} .$

Gemäß dessen erhält man den Gesamtsystemwirkungsgrad mit:

$$\eta_{GES} = \frac{W_{Motor}}{E_{Wasserstoff}} = \frac{5,3955}{76,47} \approx \underline{7,06\%} ,$$

sowie den Motorwirkungsgrad  $\eta_{Motor}$  mit:

$$\eta_{Motor} = \frac{W_{Motor}}{E_{ein}} = \frac{5,3955}{20,592} \approx \underline{26,2\%} .$$

Mit diesen neuen Informationen kann man nun auch den Wirkungsgrad  $\eta_{BZ}$  der Brennstoffzelle selbst angeben. In dem konkreten Fall beläuft er sich auf:

$$\eta_{BZ} = \frac{\eta_{GES}}{\eta_{Motor}} = \frac{0,0706}{0,262} \approx \underline{26,95\%}$$

Mit fast 27% liegt der Wirkungsgrad höher als im Vorfeld des Experiments angenommen wurde, wo von einer weit geringeren Effizienz ausgegangen wurde, auch weil es sich bei dem betrachteten Objekt mehr oder weniger um „Spielzeug“ handelt.

<sup>23</sup> Anmerkung: 0,0002679 mol entsprechen 6 ml.

<sup>24</sup> Mit h ist die insgesamt vom Gewicht gewonnene Höhe nach 11 Durchgängen bezeichnet.

<sup>25</sup> In der Tabelle wird der Betrag des Heizwertes angeführt.

<sup>26</sup> Der Wert t bezeichnet hier nicht die durchschnittliche Hebedauer, sondern die Gesamt-Hebedauer.

Die Effizienz des Elektromotors wurde hingegen leicht überschätzt, den bewiesenen 26% Wirkungsgrad steht eine Schätzung von um die 40% gegenüber.

Was das Gesamtsystem angeht, so ist eine Energieumsetzungsrate von gerade einmal 7% äußerst mager, für andere Zwecke als Brennstoffzellen-Experimente ist es nicht wirklich geeignet und auch nicht vorgesehen.

## 6. Zusammenfassung

Brennstoffzellen erzeugen über die Umkehrung der Elektrolyse aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrischen Strom und Wärme. Der dazu nötige Brennstoff Wasserstoff wird durch Umwandlungsverfahren aus Wasser oder Kohlenwasserstoffen wie Erdgas gewonnen. Charakteristisch für Brennstoffzellen ist ein hoher elektrischer Wirkungsgrad in Verbindung mit einem durch die Kraft-Wärme-Kopplung hohen Gesamtwirkungsgrad. Es gibt 6 Brennstoffzellentypen, die sich in Bezug auf Aufbau, verwendetem Elektrolyten sowie Leistungsbereich unterscheiden.

Eine Anwendungsmöglichkeit für Brennstoffzellen liegt - neben der mobilen Nutzung in Fahrzeugen - im Einbau in Wohngebäuden, wo sie in Form von Brennstoffzellen-Heizgeräten als Strom- und Wärmelieferanten fungieren können. Ein mögliches Gebiet für die Einführung solcher Brennstoffzellen-Systeme wäre das Steirische Vulkanland, eine aus 79 Gemeinden bestehende Region im Südosten der Steiermark. Die starke Zersiedelung und ein hoher Anteil von Einfamilienhäusern, kombiniert mit der in der Region angestrebten Energieautarkie bis zum Jahr 2025, machen eine dezentrale Energieversorgung mit Brennstoffzellen dort interessant.

Die aus diesem Anlass durchgeführte ausgiebige Betrachtung der Einsetzbarkeit von Brennstoffzellen-Heizgeräten im Bereich Einfamilienhäuser befasste sich mit den technologischen, wirtschaftlichen und umwelttechnischen Aspekten von Brennstoffzellen. Im Fokus standen dabei Entwicklungsstand, Systemwirkungsgrade, anfallende Kosten sowie die Umweltfreundlichkeit der Technologie.

Festgestellt wurde, dass Polymermembran- und Feststoffoxidbrennstoffzellen für die Einfamilienhaus-Versorgung am besten geeignet sind. Trotzdem mangelt es ihnen in technischer Hinsicht noch an Reife, was hauptsächlich an der viel zu geringen Lebensdauer der Systeme liegt. Weitere Anforderungen, wie die Anpassungsfähigkeit an verschiedene Bedarfssituationen oder eine einfache Bedienbarkeit werden jedoch in überzeugendem Maße erfüllt. Die wirtschaftliche Betrachtung fällt negativ aus, aufgrund sehr hoher Anschaffungspreise, welche wegen der geringen Lebensdauer nicht von den vergleichsweise niedrigen Betriebskosten amortisiert werden können.

In punkto Umweltfreundlichkeit schneiden Brennstoffzellen hingegen viel besser ab, was in niedrigen Schadstoff- und Treibhausgasemissionen begründet liegt. Diese werden durch die Kraft-Wärme-Kopplung und die kalte Verbrennung ermöglicht. Bei Gewinnung des Brennstoffes aus Biomasse können die Werte sogar noch weiter gesenkt werden, Brennstoffzellen arbeiten dann sogar CO<sub>2</sub>-neutral.

Besagte Brennstoffbeschaffung aus nachwachsenden Rohstoffen lässt sich dabei im Steirischen Vulkanland am besten über die Vergasung von Holz zu synthetischem Biogas durchführen, welches einfach über das bereits vorhandene Erdgasnetz zu den Haushalten geliefert werden kann.

Zusätzlich zu den theoretischen Ausführungen wurde auch mit einer PEM-Brennstoffzelle experimentiert und deren elektrischer Wirkungsgrad bestimmt. Der festgestellte Wert lag dabei über der im Vorfeld abgegebenen Schätzung.

## 7. Literaturverzeichnis

A&B AUSGLEICHSENERGIE & BILANZGRUPPEN-MANAGEMENT AG (2010): Applikation zum Erzeugen der monatlichen Heizgasprofile in Abhängigkeit der jeweiligen Temperaturzone. Online im Internet: URL: [http://www.a-und-b.at/gas\\_slp.php](http://www.a-und-b.at/gas_slp.php) [Stand: 28.01.10]

AICHERING, Christian; HOFBAUER, Hermann; RAUCH, Reinhard (2010): Fünf Jahre Betriebserfahrung beim Biomasse-Vergasungskraftwerk Güssing. Online im Internet: URL: [http://www.renet.at/gfx/download/biomasse/renet.at\\_fuenf\\_jahresbericht\\_guessing.pdf](http://www.renet.at/gfx/download/biomasse/renet.at_fuenf_jahresbericht_guessing.pdf) [Stand: 20.02.2010]

APCS POWER CLEARING & SETTLEMENT AG (2010): Synthetische Lastprofile. Lastprofile 2009. Online im Internet: URL: [http://www.apcs.at/static/cms/sites/apcs.at/media/DOWNLOAD\\_CENTER/SAMPLES/clearing/technical\\_clearing/load\\_profiles/SynthLoad2009.zip](http://www.apcs.at/static/cms/sites/apcs.at/media/DOWNLOAD_CENTER/SAMPLES/clearing/technical_clearing/load_profiles/SynthLoad2009.zip) [Stand: 23.01.10]

AWV RADKERSBURG: INTERREG IIIA Projekt „EnergieWirtschaft Radkersburg“. St.Peter am Ottersbach: Abfallwirtschaftsverband Radkersburg 2006

AWV RADKERSBURG; VEREIN ZUR FÖDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES: Energie-Wirtschaft-Radkersburg. Umfrageergebnisse der Energiebefragung in der Pilotregion Dez 2005. Auersbach: Steirisches Vulkanland/Abfallwirtschaftsverband Radkersburg 2006. Auch online im Internet: URL: <http://www.vulkanland.at/redirect.php5?typID=2&urlID=1863&url=http%3A%2F%2Fwww.vulkanland.at%2Fupload%2Fmedia%2Fdownloads%2Fenergievision%2Fumfrageergebnisse.pdf&sessID=8cqbrajcu55cre2skd5n7i871> [Stand 03.12.09]

BAXI INNOTECH: Technische Daten von GAMMA 1.0. Online im Internet: URL: [http://www.baxi-inno-tech.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Technische\\_Daten\\_GAMMA\\_1.0\\_\\_D\\_\\_Stand\\_090821.pdf](http://www.baxi-inno-tech.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Technische_Daten_GAMMA_1.0__D__Stand_090821.pdf) [Stand 05.02.2010]

BMWA (Hrsg.): Strategiepapier zum Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie Berlin : Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Referat Kommunikation und Internet, LP4 2005. (=Forschungsbericht 546)

DROSTE-FRANKE, Bert; BERG, Holger; KÖTTER, Annette; KRÜGER, Jörg; MAUSE, Karsten; PIELOW, Johann-Christian; ROMÉY, Ingo; ZIESEMER, Thomas: Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke. Energie-, umwelt- und technologische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung. Berlin [u.a.]: Springer 2009. (=Ethics of Science and Technology Assessment Volume 36)

EEE GÜSSING (2010): Methanierung – Synthetisches Erdgas aus Holz. Online im Internet: URL: [http://www.eee-info.net/cms/netautor/napro4/appl/na\\_professional/parse.php?mlay\\_id=2500&xmlval\\_ID\\_DOC\[0\]=1000081](http://www.eee-info.net/cms/netautor/napro4/appl/na_professional/parse.php?mlay_id=2500&xmlval_ID_DOC[0]=1000081) [Stand: 20.02.10]

GOOGLE MAPS: Kartenoption „Gelände“. Online im Internet: URL: <http://maps.google.at/?ie=UTF8&ll=46.984,15.556641&spn=1.075521,3.515625&t=p&z=9> [Stand: 25.11.09]

HEINZEL, Angelika; MAHLENDORF, Falko; ROES, Jürgen (Hrsg.): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung. Übernommen von: VIELSTICH, Wolf; LAMM, Arnold; GASTEIGER, Hubert A. (Hrsg.): Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications. Chinchester: Wiley & Sons 2003.

bzw.: BOSSEL, Ulf: The Birth of the Fuel Cell: 1835-1845. Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum 2000.

HEINZEL, Angelika; MAHLENDORF, Falko; ROES, Jürgen (Hrsg.): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung. 3. Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag 2006.

KROTSCHECK, Christian; PUCHAS, Karl: KEK-Energie „Radkersburg West“ 2007-2011. Entwicklung und Umsetzung eines kleinregionalen Entwicklungskonzeptes für eine nachhaltige Energieversorgung. Auersbach: Steirisches Vulkanland/Abfallwirtschaftsverband Radkersburg 2007.

LANDESRECHNUNGSHOF STEIERMARK: Kleinregion Feldbach und Steirisches Vulkanland. Graz: Landesrechnungshof Steiermark 2008.

LANDESSTATISTIK STEIERMARK (2009a): Steiermark: Wohnbevölkerung am 1.1.2009, Wanderungen 2008. Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 1C - Landesstatistik 2009.(= Steirische Statistiken, Heft 7/2009) Auch online im Internet: URL:[http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10003178\\_97617/efbd6317/Publikation%207-2009-Internet.pdf](http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10003178_97617/efbd6317/Publikation%207-2009-Internet.pdf) [Stand: 07.12.09]

LANDESSTATISTIK STEIERMARK (2009b): Gemeinde und Bezirksdaten. Informationen auf Gemeinde- und Bezirksebene. Online im Internet<sup>27</sup>: URL: <http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/ziel/1520864/DE/> [Stand: 07.12.09]

LANDESSTATISTIK STEIERMARK: Steiermark - Bevölkerungsstand 1.1.2006. Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 1C - Landesstatistik 2006. (= Steirische Statistiken, Heft 7/2006) Auch online im Internet: URL: [http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10003178\\_97617/08e6e093/Publikation%207-2006.pdf](http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10003178_97617/08e6e093/Publikation%207-2006.pdf) [Stand: 07.12.09]

LEHNERT, Werner; GRÜNERBEL, Manfred; MERGEL, Jürgen; WIPPERMANN, Klaus; SCHARMANN, Harald; KULIKOVSKY, Andrej; HEBLING, Christopher; WITTSTADT Ursula; SMOLINKA, Tom; GÜLZOW, Erich; SCHULZE, Mathias; KAZ, Til (2004): Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Stand und Perspektiven der PEMFC. Online im Internet: URL:

---

<sup>27</sup> Der Link bezieht sich nur auf eine übergeordnete Ansicht. Die einzelnen Statistiken erreicht man über die Auswahlliste (Bezirke) am linken Bildrand. Aus Platzgründen werden die Statistiken hier gemeinsam angeführt.

[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004\\_05\\_01.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004_05_01.pdf)  
[Stand: 09.05.09]

LINGG, Christoph (2005): Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer Brennstoffzelle. Online im Internet: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brennstoffzelle\\_funktionsprinzip.png&filetimestamp=20051010163533](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brennstoffzelle_funktionsprinzip.png&filetimestamp=20051010163533) [Stand: 25.11.09]

MERGEL, Jürgen; BOGDANOFF, Peter; GÜLZOW, Erich (2004): Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Stand und Perspektiven der DMFC. Online im Internet: URL: [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004\\_05\\_02.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004_05_02.pdf) [Stand: 09.05.09]<sup>28</sup>

MVV ENERGIE AG (2009): Brennstoffzelle. Online im Internet: [http://www.mvv-energie.de/cms/konzernportal/media/bilder/presse/pressefotos/gro\\_ansicht/zukunftstechnologien/brennstoffzelle/brennstoffzelle4.jpg](http://www.mvv-energie.de/cms/konzernportal/media/bilder/presse/pressefotos/gro_ansicht/zukunftstechnologien/brennstoffzelle/brennstoffzelle4.jpg) [Stand: 13.08.09]

ÖKO-INSTITUT e.V. (2008) : Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme. Programmversion 4.5 (Dezember 2008). Online im Internet: URL: <http://www.gemis.de/de/index.htm><sup>29</sup>; Download unter: URL: <http://www.gemis.de/files/setup/gemis45.zip><sup>30</sup> [Stand: 25.01.10]

SCHMIDT, Gunnar: Untersuchung der Struktur und Funktionsweise verschiedener GDLs und MEAs in Brennstoffzellen mittels Synchrotron-Tomografie. Berlin, Diplomarbeit 2006.

SIMANDER, Günter; HEISSENBERGER, Thomas: Brennstoffzellen-Systeme – Energietechnik der Zukunft?. Entwicklungsstand der stationären Brennstoffzellen-Technologie; Grundlagen, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Förderungsmöglichkeiten. 2. Auflage. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2000. (= Berichte aus Energie- und Umweltforschung 8/2000)

STATISTIK AUSTRIA (2010): Blick auf die Gemeinde. (= Ergebnisse der Probezählung 2006) Online im Internet<sup>31</sup>:URL: <http://www.statistik.at/blickgem/index.jsp> [Stand: 01.01.2010]

STATISTIK AUSTRIA (Hrsg.): Strom-und Gastagebuch 2008. Strom und Gaseinsatz sowie Energieeffizienz österreichischer Haushalte; Auswertung Gerätebestand und Einsatz; Projektbericht. Wien: Bundesanstalt Statistik Österreich 2009.

---

<sup>28</sup> Dieser Beitrag ist Teil des Themenheftes „Wasserstoff und Brennstoffzellen – Energieforschung im Verbund“ des Forschungsverbunds Sonnenenergie, welcher anlässlich der Jahrestagung vom 25. - 26.11.2004 in Berlin veröffentlicht wurde. Das gesamte Themenheft ist unter: <http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004.pdf> [Stand 10.05.09] als PDF abrufbar und kann wärmstens zum Lesen empfohlen werden.

<sup>29</sup> Dieser Link bezieht sich auf die GEMIS-Homepage.

<sup>30</sup> Unter dieser Adresse kann man das Setup für die GEMIS-Programminstallation herunterladen.

<sup>31</sup> Die Ergebnisse der Probezählung auf Gemeindeebene wurden für jede Gemeinde einzeln veröffentlicht, weshalb der Link nur auf eine übergeordnete Ansicht (die Gemeindeauswahl) verweist.

STATISTIK AUSTRIA: Gebäude-und Wohnungszählung 2001. Hauptergebnisse Steiermark. Wien: Bundesanstalt Statistik Austria 2004.

THEISS, Eric (2010): Entwicklungsstand bei Brennstoffzellen-Heizgeräten. Zielsetzung: lange Lebensdauer und höhere Wirkungsgrade. Online im Internet: URL: [http://www.ikz-energy.de/suche/single-view/article/entwicklungsstand-bei-brennstoffzellen-heizgeraeten.html?tx\\_ttnews\[sViewPointer\]=3&cHash=6d7b7e2a5f](http://www.ikz-energy.de/suche/single-view/article/entwicklungsstand-bei-brennstoffzellen-heizgeraeten.html?tx_ttnews[sViewPointer]=3&cHash=6d7b7e2a5f) [Stand: 05.02.2010]

VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES (2009): Vulkanlandkarte - das Steirische Vulkanland im Überblick. Online im Internet: <http://www.vulkanland.at/de/steirisches-vulkanland/vulkanlandkarte/> [Stand:12.11.09]

VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES (Hrsg.): Der Vulkanlandweg. Mit Beharrlichkeit ans Ziel.(= Bericht zur Vollversammlung des Vereins zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes 2006) Auersbach: Verein zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes 2006.

VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES: Regionaler Entwicklungsplan der LAG Steirisches Vulkanland. Feldbach: Verein zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes 2001.

WEISSENBACHER, Fabian: Persönliches Interview zum Thema „Steirisches Vulkanland“. Geführt mit Dr. Beatrix Lenz, Bad Gleichenberg, 19. Januar 2010. [Audioaufnahme und Transskript]

WIKIMEDIA COMMONS (2010): PBI-Synthese. Online im Internet: URL: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PBI-synthesis.png> [Stand: 20.02.10]

## Anhang

### I. Entwicklungsgeschichte des Steirischen Vulkanlandes

Ausgangspunkt für die Entstehung der Vulkanland-Bewegung war die relativ perspektivenlose Situation der Südoststeiermark Anfang der 1990er-Jahre: Eine von der Landwirtschaft dominierte Region mit geringer Kaufkraft in Grenzlage zum Ostblock, welche wirtschaftlich schlecht aufgebaut war und in der die meisten Berufstätigen auf das Pendeln angewiesen waren.

Bis zum EU-Beitritt Österreichs 1995 änderte sich an diesem Zustand trotz des Falls des Eisernen Vorhangs und der Investition in Thermen als lokale Impulsprojekte kaum etwas. Jedoch zwang das durch den EU-Beitritt bedingte Wegfallen der Preispolitik als Kernargument der regionalen Politik selbige dazu, neue Wege zu finden. Infolgedessen beginnt eine Kerngruppe um den damaligen Volksbürgermeister von Auersbach, dem heutigen LAbg. Ing. Josef Ober, mit der Erarbeitung eines Leitbildes und hebt im Rahmen des LEADER-II Projektes der EU die Kleinregion Feldbach aus der Taufe. Um Projekte und Initiativen auf die Beine stellen und umsetzen zu können erfolgt als nächster Schritt die Gründung des „Hauses der Region“ in Kornberg. Es dient als ein Koordinationszentrum für die oben erwähnten Projekte und etabliert sich zusätzlich dazu auch als regionale Bildungsstätte.

In Folge werden erste Projekte und Programme zur gesamt-regionalen Entwicklung initiiert sowie Wettbewerbe für innovative Ideen ausgeschrieben. Ein bemerkbarer Stimmungswandel innerhalb der Bevölkerung und der lokalen Presse weckt darauf in vielen weiteren Gemeinden der Bezirke Feldbach und Radkersburg den Wunsch, bei der Regionalentwicklung mitzuwirken.

Diese Bewegung führt schließlich 2001 zur Gründung des Steirischen Vulkanlandes. Der Name „Vulkanland“ wurde dabei aufgrund der starken Prägung der Landschaft der Region durch frühere Vulkantätigkeit gewählt. Insgesamt setzt sich das Steirische Vulkanland 2001 aus 69 Gemeinden (vgl. LENZ 2010) aus drei politischen Bezirken und einer Gesamtbevölkerung von ca. 85.000 Menschen zusammen.

Mit der Initiation des Steirischen Vulkanlandes beginnt die „zweite Regionalentwicklungsperiode“, es folgen Projekte zur Bürgerbeteiligung, wie die Schaffung der Zukunftswerkstätten, und es werden große, flächendeckende Aktionen gestartet. Beispiele dafür sind Kulturprojekte, die Nahversorgungsinitiative, ein Wissensmanagementsystem und das Jugendentwicklungsprogramm des Steirischen Vulkanlandes (JEP). Grundgedanke bei allen Projekten sind die im Leitbild<sup>32</sup> verankerten Zielsetzungen und Werte, wie Regionalität oder Nachhaltigkeit.

Bis zum Jahr 2006 treten weitere sechs Gemeinden dem Vulkanland bei, welches dann aus 75 Gemeinden aus vier Bezirken (Feldbach, Radkersburg, Fürstenfeld, Weiz) bestand (vgl. VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES STEIR. VULKANLANDES 2006; S.6).

## II. Organisation des Steirischen Vulkanlandes

Die Gemeinden des Vulkanlands bestimmen als Mitglieder des „Vereins zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes“ selbst über die maßgebliche Entwicklung der Region. Der Vereinsvorstand, welcher sich aus einem politischem Vorstand sowie einem Fachvorstand aus Themenverantwortlichen aus den Bereichen Handwerk, Kulinarik und Tourismus und Vertretern der regionalen Institutionen (AMS, Wirtschaftskammer etc.) zusammensetzt, kann somit als oberste Entscheidungsinstanz im Steirischen Vulkanland angesehen werden. Der politische Vorstand besteht zurzeit aus dem Vereinsobmann und Vorstandsvorsitzenden LAbg. Ing. Josef Ober, seinem Stellvertreter LAbg. Anton Gangl sowie den Obmännern der Kleinregionen des Steirischen Vulkanlandes (vgl. LENZ 2010).

Zusätzlich zu der Vulkanland-Mitgliedschaft sind alle teilnehmenden Gemeinden in Kleinregionen eingegliedert, deren Aufgabe darin besteht, die Umsetzung der Regionalentwicklung auf Gemeindeebene zu unterstützen und das Ansuchen um Förderungen zu erleichtern. Diese Gemeindeverbände sind dem Vulkanland formell nicht untergeordnet, d.h. sie können weitestgehend eigenständig agieren. Handlungsgrundlage ist dabei das jeweilige, im Vorfeld erarbeitete, kleinregionale Entwicklungskonzept, kurz KEK, in das jene Kleinregionen, die sich zum Steiri-

---

<sup>32</sup> siehe Kapitel 3.1: *Leitbild*

schen Vulkanland bekennen, die Themenschwerpunkte und Zielsetzung desselben mit einbauen. Durch dieses Aufnehmen von Vulkanland-Themen in das KEK entsteht somit eine inhaltliche Bindung der Kleinregionen an das Steirische Vulkanland (vgl. LENZ 2010).

### III. Berechnung: Anzahl der Einfamilienhäuser

In der Statistik (siehe STATISTIK AUSTRIA 2004, S.58f) werden Ein- und Zweifamilienhäuser, in der Spalte „Wohngebäude mit 1 oder 2 Wohnungen“ zusammengefasst. Die Zahl in der Unterrubrik „Gebäude“ entspricht also der Summe der Gebäudeanzahl der Ein- und Zweifamilienhäuser, die Zahl unter „Wohnungen“ ist die Anzahl aller Wohnungen derselben.

Setzt man nun für die Anzahl der Einfamilienhäuser die Variable  $x$  und für die Anzahl der Zweifamilienhäuser  $y$ , so erhält man die Gesamtgebäudeanzahl  $G$  mit  $G = x + y$  und die Gesamtanzahl aller Wohnungen  $W$  mit  $W = x + 2y$ , da ja jedes Zweifamilienhaus zwei Wohnungen beinhaltet. Setzt man nun die Werte für  $G$  und  $W$  ein, so erhält ein Gleichungssystem mit zwei Variablen. Auf das Vulkanland bezogen ergibt sich:

$$28377 = x + y$$

und:

$$30763 = x + 2y$$

Löst man das Gleichungssystem, erhält man  $x = 26703$  und  $y = 2030$ , wobei  $x$ , wie oben erklärt, die Anzahl der Einfamilienhäuser im Vulkanland darstellt.

### IV. Transskript – Interview zum Thema „Steirisches Vulkanland“. Geführt mit Dr. Beatrix Lenz, Geschäftsführerin der Regionalentwicklungs GmbH des Steirischen Vulkanlandes am 19.1.2010.

**„Erste Frage: Zum Vorstand des Vereins zur Förderung des Steirischen Vulkanlands. Wie sieht dieser derzeit aus, was hat er für Aufgaben?“**

**Dr. Beatrix Lenz:** „Der Vorstand ist ein 26-köpfiges Gremium aus 13 politischen und 13 nicht-politischen Mitgliedern.“

**„Stellen zweitens den sogenannten Fachvorstand dar?“**

**LENZ:** „Genau. Das sind Themenverantwortliche, beispielsweise für Handwerk, Kulinarik sowie den anderen Themengebieten des Steirischen Vulkanlandes. Der Vorstand ist oberstes Steuerungsgremium der Regionalentwicklung, Beschlussfassungsgremium und gibt die regionale Strategie für die Geschäftsjahre vor. Diese wird in Arbeitspaketen oder in Schwerpunkten definiert und man bedient sich bei der Umsetzung der GmbH.“

***„Wer ist aktuell im Fachvorstand vertreten?“***

**LENZ:** „Das sind Vertreter aus regionalen Institutionen, wie zum Beispiel AMS, Wirtschafts- oder Landwirtschaftskammer bzw. Kompetenzträger im Bereich Jugend, Bildung, Erweiterung, Produktentwicklung, Kulinarik- und Tourismusbereich. Dabei handelt es sich um kompetente Persönlichkeiten mit Erfahrungshintergrund auf dem jeweiligen Gebiet.“

***„Aus welchen Personen setzt sich der politische Vorstand zusammen?“***

**LENZ:** „Aus dem Vorstandsvorsitzenden, Obmann und für den Bezirk Feldbach Verantwortlichen, LAbg. Ing. Josef Ober, seinem Stellvertreter, LAbg. Anton Gangl, der zudem für den Bezirk Radkersburg zuständig ist, und den Obmännern der Kleinregionen. Ein weiteres Vorstandsmitglied ist die steirische Landtagspräsidentin Walburga Beutl.“

***„Um auf die Fördergelder für das Vulkanland zu sprechen zu kommen: Woher kommen diese Gelder, wer bringt sie auf?“***

**LENZ:** „Bund, Land und EU. Eine Förderung für ein Projekt oder eine Strategie kommt immer zu je einem Drittel aus Landesmitteln, Bundesmitteln sowie dem EU-Strukturfond, für den der EU-Kommissar für Regionalentwicklung zuständig ist – Derzeit ja der neue österreichische Kommissar Johannes Hahn.“

***„Stellen diese Förderungsstellen Anforderungen?“***

**LENZ:** „Ja, es gibt Förderungsrichtlinien, -vorschriften, Themenschwerpunkte - im Grunde ein umfangreiches Werk an Rahmenbedingungen, welche diese Förderungsmöglichkeiten sehr gut abbilden bzw. auch klar sagen, was nicht förderbar ist.“

***„Zu den Kleinregionen. Wie sind diese entstanden, wie ist man zu diesen hingekommen? Was sind die Aufgaben dieser Kleinregionen?“***

**LENZ:** „Der Impuls zu der Bildung von Kleinregionen ging vom Land Steiermark aus. Gemeinden sollten sich zu Gemeindeverbänden zusammenschließen, um die Regionalentwicklung sowie den Erhalt von Förderungen zu erleichtern. Das Steirische Vulkanland hat auf dem Gebiet einen wesentlichen „genetischen“ Vorteil, weil wir hier im Vulkanland immer schon gewisse kleine Gemeinden zu Kleinregionen zusammengeschlossen haben. Unabhängig davon arbeiten Gemeinden auch so schon in kleinregionalen Verbänden, beispielsweise bezüglich Abwasser, Schulbereich, Kirche – Als Beispiel die Pfarre Straden: Dort ist nicht nur Gemeinde Straden zugeordnet, sondern auch die Gemeinden Stainz bei Straden und Gosdorf.

Somit war es natürlich auch schlüssig, dass man jetzt diese informellen Kleinregionenbildungen in die neue, aktuelle Form zusammengeführt hat. – Eine Kleinregion, als Beispiel die Kleinregion Kirchberg/Labilltal, bestehend aus 4 Gemeinden, muss zukünftig ein Mitglied eines Gemeindeverbandes sein, um Förderungen und Regionalentwicklung leichter machen zu können. Da haben wir wieder einen kleinen Vorteil, weil wir schon früher diese informellen Strukturen gebildet haben und die Obmänner der Kleinregionen von jeher in den Vorstand integriert waren und dort zudem eine sehr hohe, ergebnisorientierte Sitzungskultur herrscht. Zum Vulkanland zählen 14 Kleinregionen, diese bilden das Steirische Vulkanland mehr oder weniger ab. Gewisse Randgemeinden, wie zum Beispiel die Gemeinde Ottendorf, gehören zwar zum Vulkanland, sind jedoch in keiner der 14 Vulkanland-Kleinregionen Mitglied, sondern gehören einer Kleinregion außerhalb des Vulkanlandes an. Man kann also nicht sagen, dass alle Kleinregionen (mit Vulkanland-Mitgliedsgemeinden) auch zum Steirischen Vulkanland gehören, aber bei 90% ist das der Fall.“

***„Sind die Kleinregionen vom Statut her dem Steirischen Vulkanland untergeordnet, quasi als untere Verwaltungsebene?“***

**LENZ:** „Nein, eigentlich nicht, aber die Kleinregionen müssen aufgrund einer Vorgabe des Landes Steiermark ein kleinregionales Entwicklungskonzept, das sogenannte KEK, erarbeiten, in das die Vulkanland-Kleinregionen die Themen des

Steirischen Vulkanlandes aufnehmen. Was Verwaltungsthemen anbelangt, entscheidet die Kleinregion trotzdem weiterhin autonom. Die Strategie und die Schwerpunktsetzung für gemeinsame zukünftige Projekte liefert aber das Steirische Vulkanland.“

**„Im ‚Kleinregionalen Entwicklungskonzept Radkersburg-West‘ werden sogenannte Innovationsbudgets erwähnt, mit deren Hilfe nachhaltige Projekte von den Gemeinden unterstützt werden sollen. Müssen die dafür nötigen Geldmittel von den Gemeinden selbst aufgebracht werden?“**

**LENZ:** „Ja, es erfolgt wieder eine Drittellösung. Grundvoraussetzung für eine solche Förderung ist, dass es sich bei dem Bewerber um einen Einzelakteur handelt und nicht um eine Gruppe. Die jeweilige Gemeinde, oder besser gesagt der Bürgermeister, kann dann die Förderung entweder genehmigen oder ablehnen. Wird sie genehmigt, muss die Gemeinde ein Drittel des Förderbetrages, maximal ein Startbudget von 1.000 bis 2.000 Euro, beisteuern. Ein weiteres Drittel wird dann automatisch vom Steirischen Vulkanland übernommen, für den Rest muss der Akteur selbst aufkommen. Diese Förderungen werden in den Themenschwerpunkten Handwerk, Kulinarik und Lebenskraft vergeben, um eine Vernetzung, ein neues Produkt, eine Kooperation etc. zu ermöglichen.“

**„Ist hinsichtlich der Förderungen in der Zukunft geplant, auch in Richtung Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit aktiv zu werden?“**

**LENZ:** „Das ist grundsätzlich immer ein Thema. Umweltrelevanz im Sinne der sozialen, ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit aber auch Energie wird zukünftig sicher eine Rolle spielen.“

**„Letzte Frage: Wie hat sich die Zahl der Mitgliedsgemeinden im Laufe der Zeit verändert?“**

**LENZ:** „Angefangen hat alles mit der Gemeinde Auersbach 1994, darauf folgt die Kleinregion Feldbach mit 14 Mitgliedsgemeinden, 1999 waren es 55 Gemeinden. Bei der eigentlichen Gründung des Steirischen Vulkanlandes waren es 69, 2006 75 und heute gibt es 79 Mitgliedsgemeinden.“

## **Erklärung**

*Ich, Fabian Weißenbacher, erkläre hiermit, dass ich für meine Arbeit keine anderen als die von mir angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.*

.....

*Bad Gleichenberg, den 16.03.2010*

## Arbeitsprotokoll

Datum	Tätigkeit	Anmerkungen
<b>2.Schulhalbjahr 2009</b>	Arbeit an „Übungs-FBA“ im Rahmen des Fachs „ <i>Einführung in die Praxis des wissenschaftlichen Arbeitens</i> “	Titel: „Funktionsprinzip und Typen von Brennstoffzellen“
<b>Juni 2009</b>	Themenfindung, Beginn der Literatursuche	Erste Gedanken über Hauptthema; Mobile Anwendungsgebiete im
<b>Ende Juli 2009</b>	Festlegung des Themas	Meinungsänderung zugunsten stationärer Anwendungsbereiche; Entschluss, Bezug auf das Steir. Vulkanland einzubauen
<b>11./12.8.2009</b>	Durchlesen neuer Literatur; Gedanken über Gliederung des Hauptteils;	Überarbeitung des Kapitels Brennstoffzellen; Erster Entwurf für die Einleitung
<b>21.8.2009</b>	Gespräch mit Dr. Beatrix Lenz	Thema: Kontaktaufnahme mit Vulkanland-Beauftragten (Ing. Puchas u. Dr. Krotscheck)
<b>26.8.2009</b>	Gespräch mit Dr. Christian Krotscheck im Innovationszentrum Auersbach	Themen: Energievision 2025; Wohnsituation im VL (Verbrauch, Heizsysteme)
<b>September 2009</b>	Neue Betreuungsperson	Prof. Obendrauf muss krankheitsbedingt Betreuung abgeben – MMag <sup>a</sup> . Uller springt
<b>September 2009</b>	Erste FBA-Besprechung mit MMag <sup>a</sup> . Uller	Abklären des Fortschrittes der Arbeit
<b>11.11.2009</b>	Arbeit am Kapitel Brennstoffzellen	E-Mail-Anfragen an Dr. Lenz und Ing. Puchas
<b>14. -16.11.2009</b>	Arbeit am Kapitel Steirisches Vulkanland	
<b>24.11.2009</b>	FBA-Besprechung	Ideensuche bezüglich praktischen Teil; Einigung auf Wirkungsgradbestimmung bei einer Brennstoffzelle
<b>10.12.2009</b>	FBA-Besprechung	Erhalt der Brennstoffzelle für das Experimentieren von Prof. Obendrauf
<b>18.12.2009</b>	FBA-Besprechung	
<b>20.-22.12.2009</b>	Experimente mit der Brennstoffzelle	Ausarbeitung der Versuchsprotokolle

<b>4. - 11.1.2010</b>	Textproduktion	Fertigstellen des Kapitels „Wohnsituation im Steir. Vulkanland“; Zusammentragen von Statistiken
<b>14.1.2010</b>	FBA-Besprechung	Fehleranalyse; Vorbereitung des Kapitels 4
<b>16.-17.1.2010</b>	Textproduktion	Verstärkte Arbeit am Kapitel „Einsatz in Einfamilienhäusern“
<b>21.1.2010</b>	FBA-Besprechung	
<b>13./14.2.2010</b>	Textproduktion	Abschließende Arbeiten am Kapitel „Einsatz in Einfamilienhäusern“
<b>19.-21.2.2010</b>	Textanalyse; Schreiben der Zusammenfassung	Suche nach Fehlern; reger E-Mail-Kontakt mit Betreuungsperson
<b>23.2.2010</b>	Letzte Änderungsarbeiten; Niederschrift des Protokolls	Ausmerzen von Form- und Rechtschreibfehlern
<b>24.2.2010</b>	Abschlussbesprechung mit MMag <sup>a</sup> . Uller	
<b>25.2.2010</b>	Letzte Korrekturen und Druck	