

MACHBARKEITSSTUDIE EINES ZUVERLÄSSIGEN  
INTEGRIERTEN ENERGIEKONZEPTS FÜR EIN FORSTHAUS  
IN EINÖDLAGE

FORSTHAUS MORSCHBACHER HOF



VORGELEGT VON: PROF. DR. GREGOR HOOGERS

BEARBEITUNG: SIMONE BORNER, SABINE HERZOG, DOMINIK HOFFMANN,  
HABIB MODABBER UND TOBIAS BARTH

FACHHOCHSCHULE TRIER, UMWELT-CAMPUS BIRKENFELD, JULI 2001

---

KONTAKT FORSTHAUS:

HERR DIPL. FORSTINSPEKTOR JOCHEM RAHM

67475 WEIDENTHAL

TEL.: 06329-989238

MOBIL: 0175-2969780

(VERWALTUNG: FORSTAMT ELMSTEIN)

KONTAKT STUDIE:

PROF. DR. G. HOOGERS

FACHHOCHSCHULE TRIER

UMWELT-CAMPUS BIRKENFELD

POSTFACH 1380

55761 BIRKENFELD

TEL.: 06782-171250

FAX.: 06782-171287

EMAIL: [HOOGERS@UMWELT-CAMPUS.DE](mailto:HOOGERS@UMWELT-CAMPUS.DE)

---

---

## **Danksagung**

Wir danken folgenden Personen und Institutionen, die uns im Rahmen dieses Projektes tatkräftig unterstützt haben:

Der Forstlichen Versuchsanstalt für die Erteilung des Auftrages und Herrn Dr. Seegmüller und Herrn Prof. Dr. Keilen für die freundliche Zusammenarbeit (und ihre Geduld).

Herrn Jochem Rahm und seiner Familie für ihre gute Zusammenarbeit, Gastfreundschaft und die unermüdliche Hilfsbereitschaft.

Der Energie Südwest in Landau für die Bereitstellung des Dreiphasenmessgeräts mit besonderem Dank an Herrn Hechler.

Herrn Kirsch von der Saarländischen Energieagentur für die Bereitstellung der Strommesszangen.

Dem Ingenieurbüro Dohrmann in Essen für Stromverbrauchsberechnungen.

Herrn Thomas Greiling für die hilfreiche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Klar und Herrn Dipl.-Ing. Reinhard für die Unterstützung im Bereich der Thermographie

---

---

## Zusammenfassung

Am Beispiel des Forsthauses Morschbacher Hof soll ein integriertes Konzept für eine autarke Energieversorgung eines Objekts in Einödlage erarbeitet werden. Da der Wärmebedarf des Forsthauses bereits durch eine Holz-Sonne-Kopplung gedeckt wird, ist hier insbesondere eine autonome, netzunabhängige Stromversorgung zu untersuchen, die von der Wärmeerzeugung entkoppelt ist. Die Möglichkeit der Stromerzeugung mit Brennstoffzellen soll dabei besondere Berücksichtigung erfahren.

Da das Forsthaus aufgrund einer bestehenden Netzanbindung nur eingeschränkt ein Objekt in Einödlage darstellt, untersucht die vorliegende Studie auch allgemein die Randbedingungen für Anwendungen, in denen eine Inselösung bei der Stromversorgung geeignet erscheint.

Für das Forsthaus Morschbacher Hof wird zunächst eine energetische Analyse durchgeführt, die auch die Heizwärmeversorgung mit einschließt. Weiterhin werden anhand von Thermographiebildern nach der Grundsanierung des Gebäudes noch bestehende, vereinzelte Schwachstellen in Bezug auf den Wärmeverbrauch aufgezeigt und konkrete Verbesserungsvorschläge gegeben. Hier zeigen sich insbesondere Wärmelecks an der Dachisolierung sowie an der Isolierung der Kellertür. Weiterhin weisen mehrere Fenster Wärmeverluste auf.

Die Überlegungen zur Dimensionierung einer netzunabhängigen Stromversorgung basieren auf Strommessungen direkt am Objekt. Die Prüfung verschiedener Möglichkeiten wie Stromerzeugung durch eine kleine Windkraftanlage, Photovoltaik sowie durch ein kleines Brennstoffzellen-Aggregat ergibt, dass es ökonomisch für dieses spezielle Objekt nicht sinnvoll ist, eine autarke Stromversorgung vorzusehen. Das Forsthaus ist recht gut ans Netz angebunden und weist außerdem einen überdurchschnittlich hohen Stromverbrauch auf, wie im Verlauf der Studie festgestellt wurde. Der Grund hierfür liegt nicht im Verbraucherverhalten sondern in den besonderen Erfordernissen des Wohnobjekts. Einen besonders hohen Strombedarf weisen Kühlaggregate (Wild), die erforderliche Wasserpumpe und leider auch das Heizungssystem auf.

Es zeigt sich jedoch, dass die Einrichtung eines Systems zur Notstromversorgung die Sicherheit der Energieversorgung des Objekts verbessern würde. In Folge von Windbruchschäden kam es in der Vergangenheit zu Stromausfällen von der Dauer eines Tages.

---

---

Da das derzeit verwendete Heizungssystem, die Wasserpumpe und die Telefonanlage auf Betriebsstrom angewiesen sind, wird das Haus, vor allem im Winter, nach Stromausfällen innerhalb weniger Stunden unbewohnbar. Ein kostengünstiger Vorschlag zur Notstromversorgung auf der Basis der vorhandenen Leistungsmessungen wird diskutiert.

Im allgemeinen Teil dieser Studie wird weiterhin untersucht, welche Objekte mit sporadischer Stromnutzung sich für eine autarke Stromversorgung mit Brennstoffzellen besser eignen. Aufgrund des insgesamt geringeren Stromverbrauchs und der speziellen Leistungsanforderungen sind sporadisch genutzte Wanderhütten sowie in noch größerem Maße Wetter- und Messstationen und Beleuchtungssysteme ohne Netzanbindung Anwendungen, die für Brennstoffzellensysteme auf der Basis von Wasserstoff in Frage kommen.

---

## Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Schema einer KWK-Anlage mit Brennstoffzelle	4
Abb. 2: KWK Anlage der Firma Vaillant mit Brennstoffzelle und Brenner, Modell	5
Abb. 3: Hausenergiesysteme von IFC, Avista und General Motors	6
Abb. 4: Hausenergiesystem auf SOFC-Basis (Sulzer Hexis)	6
Abb. 5: Fließbild der Protonen und der Elektronen in einer Membran-Elektroden-Einheit.	9
Abb. 6: Stack; MEA mit bipolarer Platte	10
Abb. 7: Kraftstoffspeicherung; Systemmasse in kg und Systemvolumen in Liter für ein Energieäquivalent von 45 Litern Benzin	12
Abb. 9: Grundriss des Forsthauses Morschbacher Hof	19
Abb. 10: Außentemperaturverlauf in der Messungswoche	20
Abb. 11: Beispiel Messdaten	23
Abb. 12: Summe aller Phasen an Samstag und Sonntag	24
Abb. 13: Summe aller Phasen an Wochentagen	25
Abb. 14: mittlerer Leistungsverlauf an Wochentagen	26
Abb. 15: mittlerer Leistungsverlauf am Wochenende	27
Abb. 16: Vergleich Normlastprofil mit ermitteltem Lastprofil	28
Abb. 17: Vergleich der einzelnen Phasen	29
Abb. 18: Verlauf dominiert von Kühlaggregat	30
Abb. 19: Verlauf dominiert von Kühlschränken	30
Abb. 20: Positiv/Negativ Abweichungen von durchschnittl. Leistung des Stromerzeugers	32

## Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Brennstoffzellen-Typen [HOOG00] .....	8
Tabelle 2: Übersicht über Anbieter von Brennstoffzellensystemen sowie einige Pilotprojekte – vgl. auch Abb. 3. ....	16
Tabelle 3: Auszug aus dem Datenprotokoll des Drei-Phasen Messgeräts .....	22
Tabelle 4: Zählerstände und Durchschnittsverbräuche .....	31
Tabelle 5: Anforderungen an ein Stromversorgungssystem .....	33
Tabelle 6: Angaben lt. Datenblätter Fa. Bachmann/Kaiserslautern aus Produktkatalog.....	34

## Bilderverzeichnis

	Seite
Bild 1: Ostansicht des Forsthauses Morschbacher Hof.....	18
Bild 2: Anschluss des Messgeräts und der Strommesszange an den Hausanschlusskasten .....	22
Bild 3: Kellertür oberer Bereich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	43
Bild 4: Kellertür unterer Bereich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	43
Bild 5: Kellerabgang seitlich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	43
Bild 6: Hintertür (Temperaturangaben sind nur Richtwerte) .....	44
Bild 7: Ostansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte) .....	44
Bild 8: Dachfenster Ostansicht (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	45
Bild 9: Westansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	45
Bild 10: Westansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	45
Bild 11: Ostansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte).....	46

---

---

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung

Zusammenfassung

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Bilderverzeichnis

	Seite
<b>I Allgemeiner Teil</b> .....	<b>1</b>
1 Inselsysteme / Einödlagen.....	1
1.1 Inselsysteme.....	1
1.1.1 Windkraft.....	1
1.1.2 Photovoltaik.....	2
1.1.3 Brennstoffzelle.....	2
1.2 Notstromanlage oder unterbrechungsfreie Stromversorgung.....	3
1.2.1 Windkraft und Photovoltaik.....	3
1.2.2 Brennstoffzelle.....	3
1.3 Kraft-Wärme Kopplung.....	4
1.3.1 Firma Vaillant - KWK mit Brennstoffzelle.....	5
1.3.2 Weitere Hersteller.....	6
2 Brennstoffzellen-System-Technik.....	7
2.1 Allgemeine Funktionsweise der Brennstoffzelle.....	7
2.2 Technik der Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC.....	8
2.3 Der Stack.....	9
2.4 Kenndaten.....	10
2.5 Speicherung/ Logistik.....	12
2.5.1 Druckgasspeicherung.....	12
2.5.2 Flüssiggasspeicherung.....	13
2.5.3 Adsorptionsspeicher/Metallhydridspeicher.....	13
2.5.4 Chemische Speicherung.....	14
3. Gegenwärtige Hindernisse der Brennstoffzellentechnik.....	15
<b>II. Objektorientierter Teil</b> .....	<b>18</b>
3 Objektbeschreibung und konkrete Zielsetzung.....	18
4 Ermittlung des Nutzerprofils durch Aufnahme der elektrischen Lastganglinien.....	20
4.1 Einführung.....	20
4.2 Vorgehensweise, Datenquellen und Messverfahren.....	20
4.3 Analyse der Lastganglinien.....	24
4.3.1 Messwerte des Drei-Phasen Messgeräts.....	24
4.3.2 Leistungsverlauf der einzelnen Wochentage.....	24
4.3.3 Analyse der Leistungsverläufe an den einzelnen Wochentagen.....	25
4.3.4 Mittlere Leistungsverläufe.....	26
4.3.5 Vergleich des Forsthauses mit einem Normlastprofil.....	27
4.3.6 Phasenvergleich.....	28
4.3.7 Berechnung des Durchschnittsverbrauchs.....	31
4.4 Pufferspeicher und Systemanforderungen.....	32
5 Dimensionierung.....	33
5.1 Notstromversorgung als Alternative.....	34
5.1.1 USV – Systeme.....	35

---

---

5.1.2	USV – kombiniert mit einer Brennstoffzelle.....	36
5.1.3	Dieselmotor ..... 37	37
5.2	Wirtschaftlichkeit.....	38
6	Schwachstellen bei der Hausisolierung.....	42
7	Diskussion.....	47
8	Energieeinsparungspotenziale.....	49
9	Literaturnachweis.....	50

---

# **I Allgemeiner Teil**

## **1 Inselsysteme / Einödlagen**

### **1.1 Inselsysteme**

Unter einem Inselsystem versteht man die netzunabhängige Stromversorgung einer Einrichtung oder eines Hauses in Einödlage. Beispiele für Einrichtungen in Insellagen sind abgelegene Wetter- und andere Messstationen, Sendemasten, Forschungsstationen und sporadisch genutzte Unterkünfte wie Fischer- und Wanderhütten. Ähnliche Erfordernisse haben mobile Systeme auf Sportbooten sowie in Wohnmobilen, auf die in dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen werden soll.

Traditionell werden solche Einrichtungen unter Verwendung eines Diesellagregats mit Strom versorgt. Da diese Lösung in vielen Fällen, vor allem unter ökologischen Gesichtspunkten und auf Grund der Lärmbelästigung, als nicht optimal angesehen werden, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Lösungen auf der Basis erneuerbarer Energien vorgestellt. Eine weitere, technisch innovative Möglichkeit ist die Nutzung von Brennstoffzellen. All diese alternativen Systeme streben eine umweltschonende, ökonomisch akzeptable und zuverlässige Lösung des Energieversorgungsproblems an.

Im Weiteren werden die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologien in verschiedenen Teilsystemen erörtert.

#### **1.1.1 Windkraft**

Es gibt eine Reihe von kleinen Windkraftanlagen, die als Insellösung angeboten werden. Die Einsatzmöglichkeiten der Windkraft sind extrem standortabhängig. Außerdem ist eine kontinuierliche und sichere Versorgung mit elektrischer Energie auf der Basis von Windenergie fraglich, wenn man ein Objekt in Insellage absolut zuverlässig mit Strom versorgen will. Auf die hier notwendige Speicherung der elektrischen Energie wird an späterer Stelle noch eingegangen.

### **1.1.2 Photovoltaik**

Eine weitere Möglichkeit der netzunabhängigen Versorgung eines Objekts mit elektrischer Energie ist die Verwendung von Photovoltaiksystemen. Hierbei gibt es auch wieder, in Analogie zur Windkraft, natürliche Standortprobleme. Weiterhin kann die unregelmäßige Sonneneinstrahlung im Tages- und Jahresverlauf keine kontinuierliche Versorgung garantieren. Hierdurch wird eine alleinige Versorgung durch Photovoltaik sehr kostenintensiv, da eine solche Anlage für die Strahlungsverhältnisse des Winterhalbjahrs ausgelegt werden müsste. Zu groß dimensionierte Anlagen führen im Sommer zu Stromüberschuss, der ja in Inselanlagen nicht vergütet werden kann, und zu hohen Installationskosten. Zu kleine Anlagen liefern im Winter zu wenig Strom, um autark nutzbar zu sein. Natürlich besteht auch hier eine Möglichkeit der Energiespeicherung und Pufferung.

Ebenso sind Kombinationen verschiedener Systeme wie z.B. der Photovoltaik und Brennstoffzelle denkbar. Jedoch sind die hohen Investitionskosten für Einzel- oder Kombinationslösungen hoch. Eine weitere Möglichkeit der Kombination bieten Windkraft und Photovoltaik. Diese Systeme haben sich schon in verschiedenen Installationen bewährt. An sonnenreichen aber windarmen Tagen deckt die Photovoltaikanlage den Bedarf und an windreichen und sonnenarmen Tagen deckt die Windanlage den Bedarf. Ein Batteriesystem dient hier als Energiespeicher. Natürlich sind auch hierbei die hohen Investitionskosten zu beachten.

### **1.1.3 Brennstoffzelle**

Eine dritte hier diskutierte Technologie ist die der Brennstoffzelle. Eine Brennstoffzelle zur Versorgung eines Inselsystems kann dann sinnvoll sein, wenn der erforderliche Brennstoff entweder am Ort vorhanden ist oder kostengünstig angeliefert und gelagert werden kann. Je höher jedoch der Energiebedarf ist, desto größer muss die Lagerkapazität sein und desto problematischer wird die Speicherung der Energie. Mögliche Formen der Speicherung sind:

- gasförmiger Wasserstoff
- flüssiger Wasserstoff
- die Verwendung einer Reformertechnologie in Verbindung mit flüssigen Energieträgern wie Methanol oder Flüssiggas

Es werden auch Kombinationen von PV und Brennstoffzellen-Systemen diskutiert. Die bereits oben erwähnte Speicherproblematik im Bereich Photovoltaik oder Windkraft beruht auf den begrenzten Möglichkeiten des Einsatzes von Batterien. Den mit Hilfe von Photovoltaik-elementen oder Windkraft gewonnenen Strom zur Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe der Elektrolyse von Wasser zu nutzen, ist eine Möglichkeit, einen Energiepuffer zu schaffen, der dann mit Hilfe einer Brennstoffzelle zum richtigem Zeitpunkt in Strom umgewandelt wird. Hier ist jedoch mit gerade für kleine Systeme erheblichen Investitionskosten zu rechnen.

## **1.2 Notstromanlage oder unterbrechungsfreie Stromversorgung**

Eine alternative Einsatzmöglichkeit der diskutierten Systeme wäre ein Einsatz als Notstromanlage (oder auch unterbrechungsfreie Stromversorgung). Natürlich hätte ein solches System nicht nur Bedeutung im Falle eines Stromausfalles, sondern es wäre auch eine Nutzung als vorübergehende Stromversorgungseinrichtung denkbar. Eine abgelegene Waldhütte könnte dann mit Strom versorgt werden, genauso wie elektrische Geräte bei einem Stromausfall.

### **1.2.1 Windkraft und Photovoltaik**

Es wurde bereits erläutert, dass Windkraft und Photovoltaik, alleine eingesetzt, die Anforderungen einer Notstromanlage oder einer unterbrechungsfreien Stromversorgung nicht erfüllen und nur in Kombination mit anderen Systemen wie z.B. einem Energiepuffersystem zu diesem Zweck nützlich sind. Es ist jedoch zu bezweifeln, ob ein solches kostenintensives System zum Einsatz kommen wird, wenn billigere Lösungen realisierbar sind.

### **1.2.2 Brennstoffzelle**

Im Falle der Brennstoffzelle als Notstromversorgung oder unterbrechungsfreie Stromversorgung sehen die Voraussetzungen anders aus. Ein vollentwickeltes Brennstoffzellensystem kann, mit ausreichendem Brennstoff versorgt, eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gewährleisten. Genauso kann aber dieses

Brennstoffzellensystem für einen kurzen Zeitraum die Versorgung einer Waldhütte oder einer ähnlichen Einrichtung sicherstellen.

### 1.3 Kraft-Wärme Kopplung

Unter Kraft-Wärmekopplung versteht ein System zur gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie. Man erhöht damit den Gesamtwirkungsgrad und die Primärenergieausnutzung. Die Kraft-Wärme Kopplung stellt somit eine ökologisch sinnvolle Lösung da. Ein Nachteil liegt hier im systemabhängig meist festen Verhältnis zwischen gewonnener Wärme und erzeugtem Strom, das nicht ohne weiteres beliebig geändert werden kann. Bei der Auslegung der jeweiligen Anlage muss daher zunächst geklärt werden, welches Verhältnis von Strom und Wärme man anstrebt. Der durchschnittliche Energiebedarf von Mehrfamilienhäusern besteht zu etwa 70 % aus Heizenergie und 30 % aus Strom. Eine Reihe von Herstellern bieten motorische BHKWs an. Dies sind, bei der für Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern interessanten Größenklasse, in Deutschland vor allem die Firmen Valentin (EcoPower BHKW) und Senertech (Dachs BHKW). Von diesen beiden Systemen weist das EcoPower BHKW durch seine elektronische Regelung das günstigere Teillastverhalten mit ca. 20% konstantem Stromanteil auf.

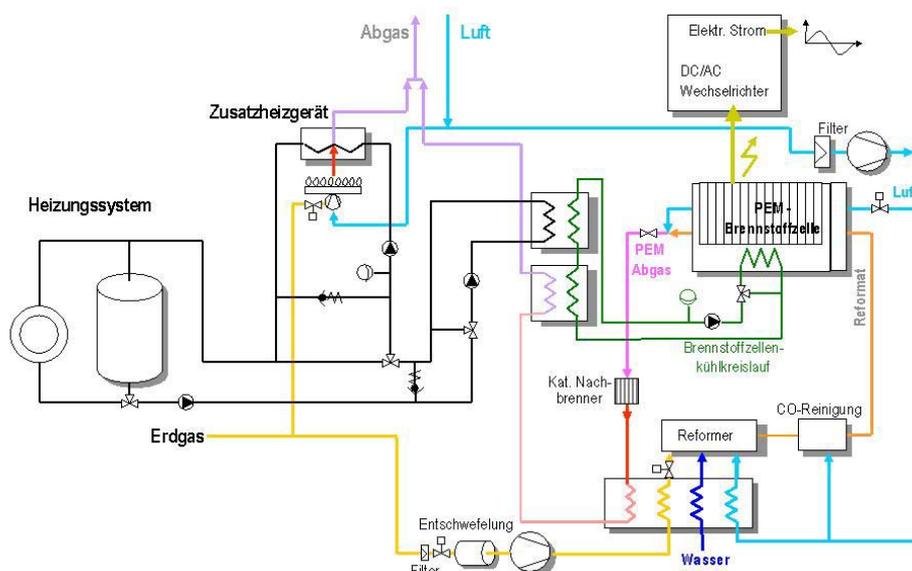
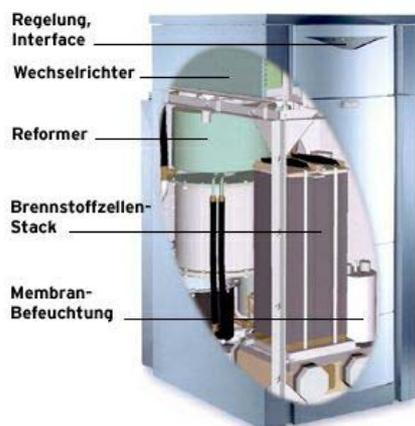


Abb. 1: Schema einer KWK-Anlage mit Brennstoffzelle [VAIL01]

### 1.3.1 Firma Vaillant - KWK mit Brennstoffzelle

Zur Zeit entwickelt die Firma Vaillant in enger Partnerschaft mit Plug Power (USA) ein Hausenergieversorgungssystem mit KWK, basierend auf dem Brennstoff Erdgas. Dieser wird einer Brennstoffzelle zugeführt, die daraus mit hohem Wirkungsgrad (etwa 35%) Strom gewinnt. Die Abwärme der Brennstoffzelle wird zur Warmwassererzeugung genutzt. Reicht dieser Anteil an Warmwasser nicht aus, um den Bedarf zu decken, dann schaltet sich ein Gasbrenner ein, um weiteres Warmwasser zu liefern. Im eigentlichen Sinn stellt dies ein kleines Blockheizkraftwerk mit zuschaltbarem Brenner dar – vgl. Abb. 1 u. 2. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Möglichkeit, Strom- und Wärmeerzeugung weitgehend zu entkoppeln, um so flexibler auf den aktuellen Bedarf des Objekts eingehen zu können. Die Entwicklung dieser Idee zu einem marktfähigen Produkt wird mit großem Aufwand vorangetrieben. Durch die große Preisdifferenz zwischen einer Kilowattstunde Erdgas (ca. 5,5 Pf) und einer Kilowattstunde Strom (ca. 25 Pf) kann mit Hilfe eines Brennstoffzellen-Heizgerätes dezentral sehr günstig aus Erdgas elektrischer Strom produziert werden. Mit Einführung der Ökosteuer verschiebt sich das Verhältnis zugunsten des Brennstoffzellen-Heizgerätes. Die in der Brennstoffzelle produzierte Wärme wird zur Warmwasserbereitung und Raumheizung genutzt, so dass das Erdgas nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch optimiert genutzt wird. Durch diese erhebliche Minderung der Betriebskosten rechnet man mit einer Amortisation des Brennstoffzellen-Heizgeräts gegenüber einer konventionellen getrennten Strom- und Wärmeversorgung binnen weniger Jahre.



**Abb. 2:** KWK Anlage der Firma Vaillant mit Brennstoffzelle und Brenner, Modell [VAIL01]

### 1.3.2 Weitere Hersteller

Es arbeiten auch andere Firmen an Projekten dieser Art. Von den deutschen Heizungsherstellern haben inzwischen auch die Firmen Buderus und Viessmann die Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen angekündigt. Weiterhin bietet die Firma Hamburger Gas Consult einen Prototypen an.

Allerdings verwenden diese Anlagen in aller Regel im Kern (Brennstoffzellen-Stack und Reformer) Systeme aus US-amerikanischer Entwicklung. Wichtige US Firmen sind IFC, Avista, Nuvera, DAIS-Analytic, Energy Partners, H-Power und IdaTech, die eigene Systeme für die Hausenergieversorgung auf der Basis von Membran-Brennstoffzellen anbieten - vgl. Abb. 3. Überraschend hat auch General Motors Aktivitäten auf diesem Sektor angekündigt.



**Abb. 3:** Hausenergiesysteme von IFC, Avista und General Motors.

Eine Ausnahme stellt die Firma Sulzer Hexis (Schweiz) dar, deren Prototyp mit 1kW elektrischer Leistung auf der oxidkeramische Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC) beruht.



**Abb. 4:** Hausenergiesystem auf SOFC-Basis (Sulzer Hexis)

## 2 Brennstoffzellen-System-Technik

### 2.1 Allgemeine Funktionsweise der Brennstoffzelle

Die Veranschaulichung der allgemeinen Funktionsweise einer Brennstoffzelle erfolgt in diesem Kapitel am Beispiel der Membran-Brennstoffzelle (PEMFC = Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Die PEMFC wird derzeit am intensivsten entwickelt. Sie hat sich für den häuslichen Bereich sowie für mobile Anwendungen (PKW, Bus, LKW) bereits bewährt und soll in den nächsten Jahren zur Serienreife gelangen.

Die Vorteile der PEMFC liegen in folgenden Punkten:

- Niedrige Betriebstemperatur (50 – 100°C) → kurze Anfahrzeiten
- Keine Verwendung von gefährdenden Stoffen (z.B. Säuren)
- Geringe CO<sub>2</sub> – Empfindlichkeit → funktioniert auch mit Umgebungsluft und nicht nur mit reinem Sauerstoff
- Hier sind als Brennstoff auch reformierte Kohlenwasserstoffe einsetzbar
- Für Kleinanwendungen im kW-Bereich wegen der Größe gut nutzbar (wird auch in Fahrzeugen für die Bordenergieerzeugung diskutiert)
- Der Elektrolyt wird im Gegensatz zur alkalischen Brennstoffzelle nicht verbraucht
- Von der Nutzung der PEMFC im Automobilssektor erhofft man sich mittelfristige Kostenvorteile

Neben der PEMFC gibt es noch andere Konstruktionen. Man unterscheidet fünf verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die nach dem verwendeten Elektrolyten benannt sind:

Brennstoffzellentyp	Elektrolyt	Ladungs- träger	Betriebs- temperatur	Leistung/ Verwendung
<b>Alkalische -BZ</b> (AFC)	Kalilauge	$\text{OH}^-$	50-100 °C	Raumfahrt
<b>Polymermembran - BZ (PEMFC)</b>	Festpolymer	$\text{H}^+$	50-100 °C	Verkehr, Kleinkraftwerk
<b>Phosphorsaure - BZ (PAFC)</b>	Phosphor- säure	$\text{H}^+$	~ 220 °C	Heizkraftwerke, Anlagen mit 200 kW
<b>Karbonatschmelzen -BZ (MCFC)</b>	Lithium- und Kaliumcarbonat	$\text{CO}_3^{2-}$	~ 650 °C	< 250 kW, sowie im MW - Bereich
<b>Oxidkeramische - BZ (SOFC)</b>	Fest- Elektrolyt (Zirkonoxid)	$\text{O}^{2-}$	500-1000 °C	2 kW - bis MW Bereich

**Tabelle 1:** Übersicht über verschiedene Brennstoffzellen-Typen [HOOG00]

## 2.2 Technik der Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC

Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle basiert auf der Umkehrung der Elektrolyse. Bei der Elektrolyse wird mit Hilfe von elektrischem Strom Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. In der Brennstoffzelle wird aus Sauerstoff und Wasserstoff Wasser und elektrische Energie produziert. Bei dieser elektrochemischen Reaktion wird die chemische Energie eines Energieträgers direkt, d.h. ohne den Umweg über die thermische Umwandlung, in Strom und Wärme umgewandelt.

Diese Umwandlung erzielt hohe Wirkungsgrade, wobei – im Wasserstoffbetrieb - keine Emissionen entstehen. Die Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, Anode und Kathode, und aus einem Elektrolyten, der die beiden Elektroden elektrisch voneinander isoliert (Abb. 5). Parallel zur Anodenoberfläche strömt wasserstoffreiches Gas ein. Hier spaltet sich der Wasserstoff in Protonen und Elektronen. Die Elektronen fließen im äußeren Stromkreis über einen Verbraucher zur Kathode.

Die Kathodenoberfläche wird mit Luft umströmt. Der in der Luft enthaltene Luftsauerstoff reagiert an der Kathodenseite mit Protonen und Elektronen zu Wasser.

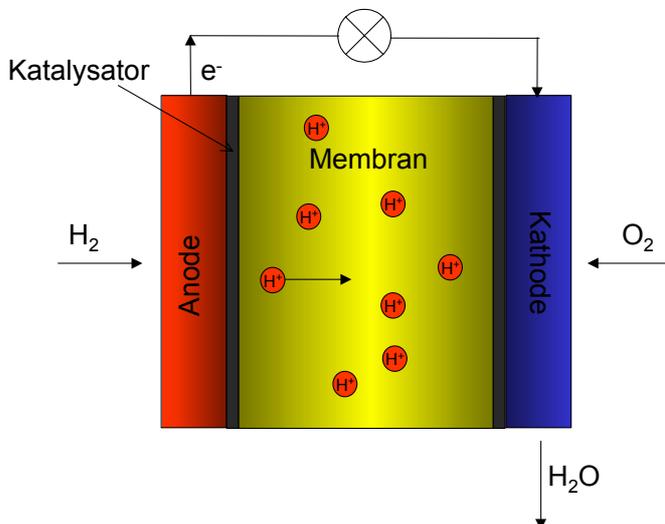
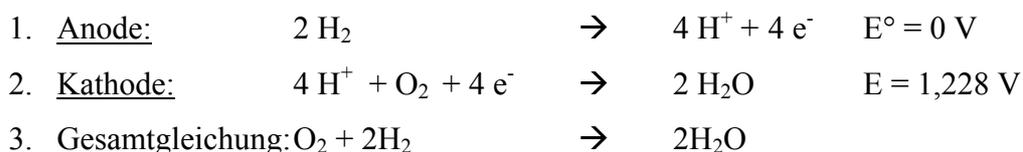


Abb. 5: Fließbild der Protonen und der Elektronen in einer Membran-Elektroden-Einheit.

Bei der PEMFC bestehen Anode und Kathode aus katalytisch beschichteten Kohlenstoffpapieren. Der Elektrolyt ist eine ionenleitende Polymerelektrolytmembran.

Die Reaktion lässt sich mit folgenden Reaktionsgleichungen beschreiben:

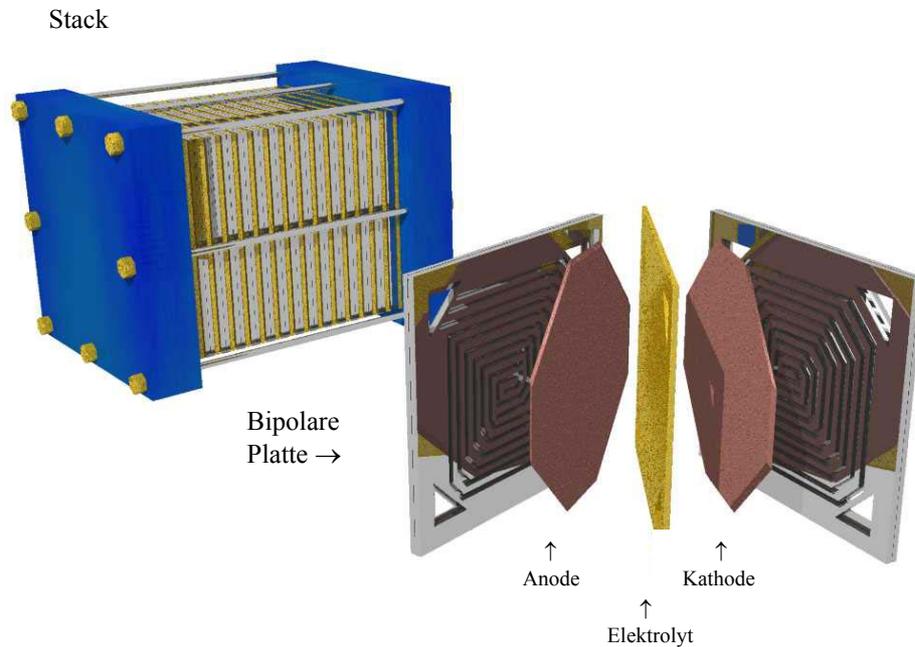


## 2.3 Der Stack

Da eine einzelne Membran-Elektroden-Einheit (MEA = Membrane Electrode Assembly) nur ein Zellpotenzial von 0,7 Volt [HOOG00] aufweist, schaltet man mehrere Zellen mit Hilfe einer bipolaren Platte hintereinander. Den Zusammenschluss mehrerer solcher Einheiten mit Hilfe sog. Bipolarplatten bezeichnet man als einen „Stack“.

Eine Bipolarplatte, die aus Graphit oder Metall besteht, verbindet die Kathode der einen Zelle mit der Anode der folgenden Zelle und versorgt gleichzeitig die Kathode mit Sauerstoff und

die Anode mit Wasserstoff. Die Stromstärke ist dabei von der Membranfläche und von der elektrischen Last abhängig.



**Abb. 6:** Stack; MEA mit bipolarer Platte [HOOG99]

## 2.4 Kenndaten

Die maximale Zellspannung, also das reversible Potential, berechnet sich wie folgt[KHAR97]:

$$U_{rev} = \frac{-\Delta G}{n * F} = \frac{-(-237,14kJ / mol)}{2mol * 96.487C / mol} = 1,228V$$

F = Faradaysche Konstante (96.487 C/mol)

Leistungsdichte:  $\geq 1$  kW/l [HOOG00]

Wasserstoffverbrauch: ca. 1100 l/ kWh

Dieser letzte Wert einer PEMFC (unter Normbedingungen) lässt sich berechnen nach den Formeln:

$$V = \frac{R^* * T * n}{p} = \frac{8314,2 Nm / (kmol * K) * 273,15 K * 0,001 kmol}{10^5 N / m^2} = 0,02271 m^3$$

V = Volumen eines Mols bei Normdruck und Normtemperatur

R<sub>u</sub> = universelle Gaskonstante (in kJ/kmol\*K)

T = Norm-Temperatur (273,15 K = 0°C)

P = Normdruck (10<sup>5</sup> Pa)

n = Anzahl der Elektronen, die pro mol Brennstoff an der Reaktion teilnehmen

$$\Rightarrow V = 0,02271 m^3 = 22,71 dm^3 = 22,71 \text{ Liter}$$

Bei einem Wirkungsgrad von 40 % hat ein mol Wasserstoff eine Energie von 94,856 kJ.

$$E = -\Delta G * 0,4 = - (-237,14 \text{ kJ/mol}) * 0,4 = 94,856 \text{ kJ/mol}$$

mit  $\Delta G = -237,14 \text{ kJ/Mol}$  (Änderung der Gibbsschen freien Energie; bei 25 °C und 1 bar) [KHAR97]

94,856 kJ entsprechen 0,0264 kWh

In einer kWh sind folglich 37,92 mol enthalten. Diese 37,92 mol nehmen unter Normbedingungen 861,16 Normliter ein.

Da der Verbrauch des Wasserstoffs an der Anode aus systemtechnischen Gründen bei der Brennstoffzelle aber nur etwa 80 % beträgt [HOOG00] (20 % reagieren nicht), errechnet sich das tatsächlich benötigte Wasserstoffvolumen wie folgt:

$$V_{\text{real}} = 1/0,8 * 861,16 l = 1076,45 l$$

Als Ergebnis lässt sich allgemein festhalten, dass man bei einem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von 40 % ca. 1100 Liter gasförmigen Wasserstoff (bei Normbedingungen) benötigt, um 1 kWh Strom zu erzeugen.

### **1100 Liter Wasserstoff für 1 kWh**

Geht man nun davon aus, dass in einer 50 l Druckgasflasche 10.105,95 Normliter Wasserstoff enthalten sind, lassen sich hiermit 9,18 kWh, also fast 10 kWh Strom erzeugen.

## 2.5 Speicherung/ Logistik

Um den benötigten Treibstoff für die Brennstoffzelle zu speichern, gibt es grundsätzlich vier verschiedene Möglichkeiten[INNO01]:

- Druckgasspeicherung
- Flüssiggasspeicherung
- Adsorptionsspeicherung
- Chemische Speicherung (Methanol, Benzin, Propan usw. und Umformung zu Wasserstoff vor Ort)

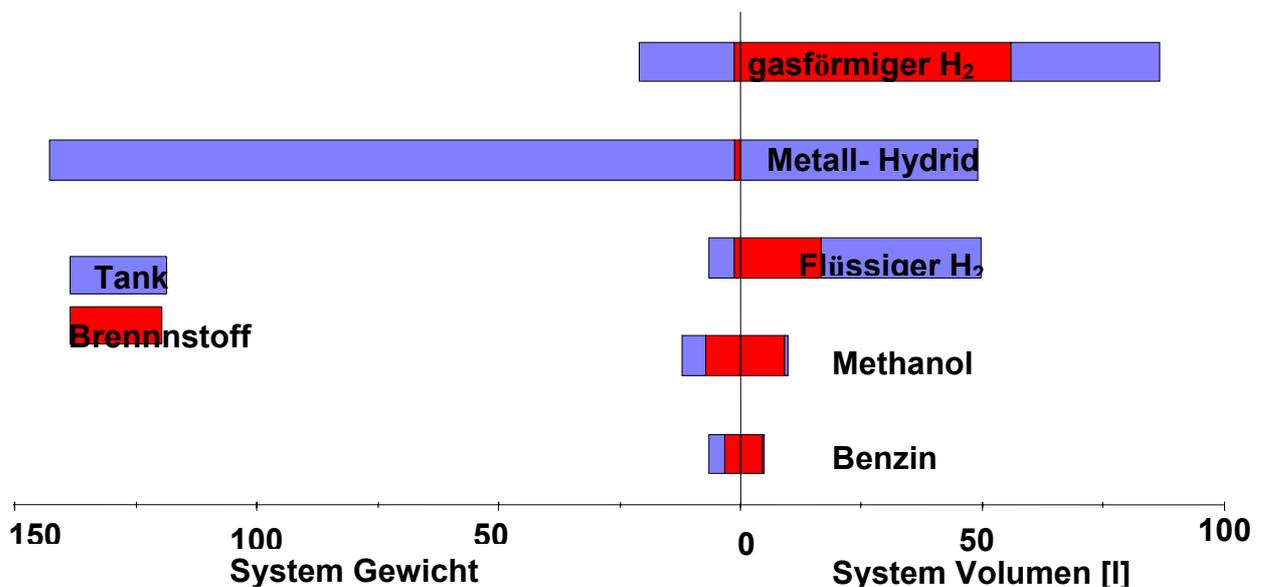


Abb. 7: Kraftstoffspeicherung; Systemmasse in kg und Systemvolumen in Liter für ein Energieäquivalent von 45 Litern Benzin [HOOG99].

### 2.5.1 Druckgasspeicherung

Hierbei wird der Wasserstoff auf einen Druck weit über dem Umgebungsdruck komprimiert. Die verschiedenen Tanks unterscheiden sich im Aufbau, nach Einsatzgebiet und Druckniveau.

Die Lagerung in Stahlflaschen ist die geläufigste Art, Wasserstoff zu speichern. Der Wasserstoff wird mit einem Druck von 200 oder 300 bar betankt.

Eine andere Möglichkeit ist die Lagerung in Tanks aus Kohlefaserverbundwerkstoff mit innenliegendem Aluminiumgehäuse, so wie sie bei Brennstoffzellenbetriebenen Bussen angewendet wird. Auch hier wird der Tank mit 300 bar betankt. Dieser Tank hat den Nachteil, dass er etwa dreimal so teuer ist wie ein herkömmlicher Stahltank.

### **2.5.2 Flüssiggasspeicherung**

In flüssigem Zustand hat Wasserstoff, bezogen auf das Volumen, die höchste Speicherdichte (Verflüssigung bei  $-253\text{ °C}$ ). In sog. Kryotanks wird der flüssige und tiefkalte Wasserstoff gespeichert. Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff bietet sich allerdings, wegen des hohen Energieaufwandes zur Verflüssigung, höchstens bei Fahrzeugen an, wenn keine sinnvollen Alternativen zur Speicherung reinen Wasserstoffs existieren. Stationäre Flüssiggasspeicher bieten sich nur dort an, wo der Wasserstoff auch in flüssiger Form verwendet wird (z.B. an Tankstellen) oder wo große Mengen an Wasserstoff benötigt werden.

### **2.5.3 Adsorptionsspeicher/Metallhydridspeicher**

Bei dieser Methode wird der Wasserstoff von bestimmten Metalllegierungen adsorbiert und es bilden sich Metallhydride.

Die Reaktionsgleichung hierfür lautet: 
$$M + H_2 \rightarrow MH_2$$

Bei der Befüllung des Metallhydrids mit Wasserstoff wird Wärme freigesetzt. Möchte man den Wasserstoff wieder abspalten, muss man wieder Wärme zuführen.

Metallhydridspeicher werden vor allem für kleine Speichermengen diskutiert. Bei Wasserstoffmengen, wie Sie zur Betankung von PKW erforderlich sind, machen sich das hohe Gewicht des Metallhydridspeichers (vgl. Abb. 7) sowie die Energieverluste durch den exothermen Betankungsvorgang (ca. 20% des Heizwertes) bemerkbar.

Es gibt bereits Firmen, die sich auf die Konstruktion und den Bau dieser Hydridtanks spezialisiert haben und diese zum Verkauf anbieten.

#### **2.5.4 Chemische Speicherung**

Die Betankung eines Brennstoffzellensystems mit einem herkömmlichen, flüssigen Kraftstoff und die anschließende Umwandlung (sog. Reformierung) in Wasserstoff kann man auch als chemische Speicherung auffassen. Diese Lösung wird vor allem für PKW diskutiert.

### 3. Gegenwärtige Hindernisse der Brennstoffzellentechnik

Das grundsätzliche Problem der Brennstoffzelle ist die Tatsache, dass die Systemtechnik in dem von uns benötigten Maßstab derzeit ausschließlich in Pilotprojekten verwendet wird.

Bei den mobilen Anwendungen sind zwar in den letzten zehn Jahren große Fortschritte zu verbuchen, von der Serienreife ist die Technik allerdings mindestens noch zwei bis drei Jahre entfernt.

Auch bei der Brenngasbereitung für stationäre Systeme sind noch einige Probleme zu beseitigen. Bei bisher durchgeführten Projekten wurde dieses Problem durch die Verwendung von Erdgas in Kombination mit einem Reformier gelöst. Durch die bereits gut entwickelte Reformiertechnik ist dies der einfachste Weg, die Speicherproblematik zu umgehen.

Wenn jedoch keine Anbindung an das öffentliche Gasnetz vorhanden ist, steht man auch hier wieder vor dem Speicherproblem, da die bisher entwickelten Speichermöglichkeiten keine ausreichende Kapazität aufweisen, um z.B. ein Einfamilienhaus kontinuierlich mit Strom zu versorgen. Als Ausweg bleibt eventuell die chemische Speicherung von Flüssiggas, die vor allem in den USA zur Stromerzeugung in abgelegenen Regionen (keine Wärmenutzung) diskutiert wird.

Eine kurze Übersicht über

- bereits bestehende Projekte
- marktführende Anbieter von Brennstoffzellen
- Speichermöglichkeiten
- den Stand der Technik

soll einen aktuellen Überblick ermöglichen.

<b>Anbieter</b>	<b>Brennstoffzellen-Typ (Brennstoff)</b>	<b>Größe</b>	<b>Verwendung</b>
<b>DAIS-Analytic Corporation; Florida</b>	PEMFC	10-200 W 2 kW	Labors, Unterricht
<b>H-Power Corporation, New Jersey</b>	PEMFC	4,5-10 kW	Pilotprojekte
<b>Heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin</b>	PEMFC	10-100 W	Unterricht, Labors
<b>Ballard Generation Systems</b>	PEMFC	250 kW	Pilotprojekte in Deutschland, Kanada
<b>Plug Power, USA</b>	PEMFC	< 10 kW	In Zusammenarbeit mit der Fa. Vaillant Vermarktung von Brennstoffzellen-Heizsystemen
<b>Sulzer-HEXIS, Zürich</b>	SOFC	2 kW	Kleinanlagen im Testbetrieb
<b>Energy Partners</b>	PEMFC	3 - 50 kW	Feldtests an Einfamilienhäusern in Amerika, sollen auch als Notstromversorgung genutzt werden
<b>International Fuel Cells</b>	PAFC	Im Bereich 200 kW	Pilotprojekte
<b>Xcellsis Fuel Cell Engines Inc.</b>	PEMFC (Methanol, Flüssigwasserstoff)	2-205 kW	Autos, Busse
<b>Northwest Power Systems/ IdaTech</b>	PEMFC (Methanol, Flüssigwasserstoff)	1-3 kW	Mobile Anwendungen für Camping, Boote
<b>MTU Friedrichshafen</b>	MCFC	250 kW	Uni Bielefeld, im Rhoen- Klinikum in Bad Neustadt/Saale
<b>Hamburger Gas Consult (in Zusammenarbeit mit DAIS)</b>	PEMFC	3 kW	Pilotprojekte, in Machern, Hamburg u.v.m.
<b>Wingas in Zusammenarbeit mit Hamburg Gas Consult</b>	PEMFC	3 kW	Pilotprojekt eines BHKW in Brunckviertel, Ludwigshafen

Tabelle 2: Übersicht über Anbieter von Brennstoffzellensystemen sowie einige Pilotprojekte – vgl. auch Abb. 3.

Wie bereits oben erwähnt wurde, bieten die heutigen Speichermöglichkeiten keine ausreichenden Kapazitäten, um Einfamilienhäuser mehrere Tage oder Wochen mit Strom zu versorgen.

Neben der fehlenden Speicherkapazität fehlt auch bis heute noch eine funktionierende Logistik, um den Wasserstoff an seinen Verwendungsort zu bringen. In Deutschland gibt es bislang nur zwei Möglichkeiten, wie der Wasserstoff zu seinem Verwendungsort gelangen kann:

- In Stahlflaschen von einem Gasbefüllungsunternehmen (z.B. Messer - Griesheim, Westfalen Gas, Hamburger Gaswerke)
- Durch Tankfahrzeuge mit Flüssigwasserstoff (z.B. Messer - Griesheim, Westfalen Gas, Hamburger Gaswerke)

Es stellt sich daher als großes Problem dar, den Wasserstoff an seinen Verwendungsort zu bringen bzw. Wasserstoff zu erhalten ohne Anbindung an das öffentliche Gasnetz. Projekte wie die Flüssigwasserstoff-Tankstelle am Münchner Flughafen dienen bis heute nur als Versuchsprojekte und werden dies auch in naher Zukunft noch bleiben.

## II. Objektorientierter Teil

### 3 Objektbeschreibung und konkrete Zielsetzung

Konkretes Objekt für unsere Studie zur zuverlässigen, kaltstartfähigen und umweltfreundlichen Stromversorgung für Forsthäuser in Einödlagen war das Forsthaus Morschbacher Hof (Herr Jochem Rahm) in 67475 Weidenthal.

Das Forsthaus wird bewohnt vom Förster des Forstamtes Elmstein mit seiner 4-köpfigen Familie. Es liegt mitten im Wald, ca. 3-4 Kilometer entfernt von der nächsten Ortschaft. Auf dem Grundstück befindet sich das Wohnhaus und ein Nebengebäude, in dem eine Garage und ein Stall sowie die Heizungsanlage untergebracht sind. Außerdem existiert eine Kühlzelle für Wild im Nebengebäude. Bereits vorhanden ist die Warmwasserbereitung mittels einer Holz-Sonne-Kopplung in Form einer Solarthermieanlage in Verbindung mit einem Stückholzverbrennungsofen. Die Solarthermikkollektoren sind auf dem Dach des Nebengebäudes angebracht. Die Stromversorgung ist durch einen Anschluss an die Verbindung zwischen den Dörfern Neidenfels, Weidenthal und Esthal gesichert. Das Trinkwasser wird aus einem eigenen Brunnen gewonnen, der mit einer Pumpe betrieben wird. Mit einem Kalkzusatzgerät wird das Wasser aufbereitet.



Bild 1: Ostansicht des Forsthauses Morschbacher Hof

Ziel des Projektes war die Erstellung einer Machbarkeitsstudie zur netzunabhängigen Deckung des Strombedarfs mit Hilfe einer Brennstoffzelle. Hierdurch werden einerseits Netz-Anbindungskosten vermieden und andererseits die Versorgungssicherheit verbessert. Durch die Lage bedingt, kann es im Winter durch Windbruchschäden zu Stromausfällen kommen,

was die Vergangenheit bereits gezeigt hat. Die Studie sollte Modellcharakter besitzen und auf andere Objekte übertragbar sein.

Um den Strombedarf zu ermitteln, wurde eine theoretische Betrachtung aller Stromverbraucher vorgenommen, außerdem eine Messung des tatsächlichen Verbrauchs durchgeführt. Die Strommessung wurde mit Hilfe eines Dreiphasenmessgerätes (Powerrecorder der Firma Reliable Power Meters) sowie zusätzlich mit einer Strommesszange in Verbindung mit einem Multimeter und einem Laptop an einer der drei Phasen vorgenommen. Die Messung erfolgte über den Zeitraum von einer Woche.

Zusätzlich wurden mit einer Thermografiekamera Aufnahmen an verschiedenen Stellen des Hauses gemacht, um weitere Energieeinsparungspotenziale bei der Wärmedämmung zu ermitteln. Hierbei zeigte sich, dass es einige Stellen am Haus gibt, die durchaus noch Verbesserungspotenzial aufweisen.

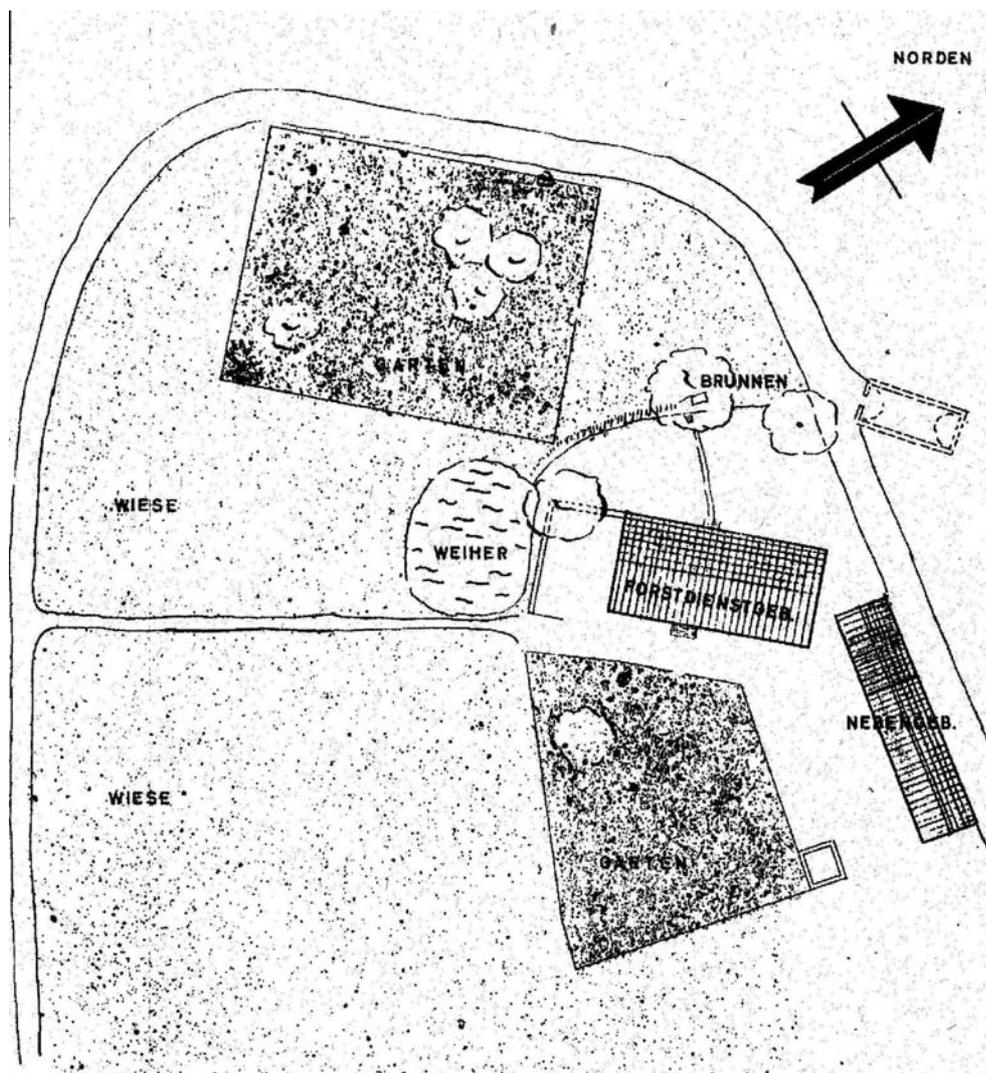


Abb. 9: Grundriss des Forsthauses Morschbacher Hof

## 4 Ermittlung des Nutzerprofils durch Aufnahme der elektrischen Lastganglinien

### 4.1 Einführung

Die Ermittlung des Nutzerprofils erfolgte durch die Aufnahme der elektrischen Lastganglinien. Mit ihnen lässt sich das Verbraucherverhalten der Bewohner sowie das der halb- und vollautomatischen Steuerungseinheiten von Großverbrauchern, wie Kühlschränken, Gefriertruhen und der Heizungspumpen, ableiten und grafisch darstellen. Weiterhin ist es an Hand der gewonnenen Daten möglich, das Stromversorgungssystem zu dimensionieren und die daran gestellten Anforderungen zu definieren. Ebenso lassen sich Störungen und Unregelmäßigkeiten im Wochenverlauf identifizieren und u.U. den verursachenden Quellen zuweisen. Die erhaltenen Daten werden schließlich mit bekannten, sog. Normlastprofilen verglichen, um Aussagen über deren Allgemeingültigkeit treffen zu können und dadurch denkbare Übertragungsmöglichkeiten auf andere Einödlagen abzuleiten.

### 4.2 Vorgehensweise, Datenquellen und Messverfahren

Die Messung wurde während einer typischen Winterwoche, vom 17.01.2001 bis 24.01.2001 durchgeführt. Die Außentemperaturen waren für den Januar typisch, gegen Ende der Woche ein wenig zu warm.

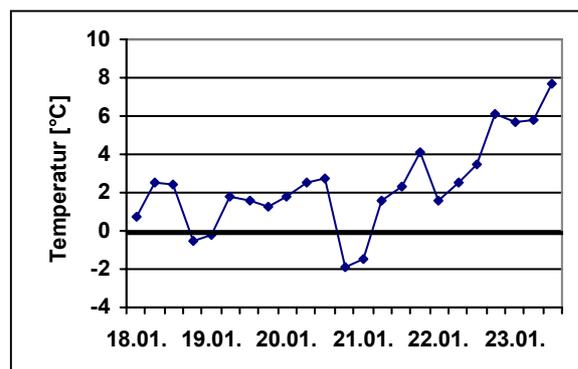


Abb. 10: Außentemperaturverlauf in der Messungswoche

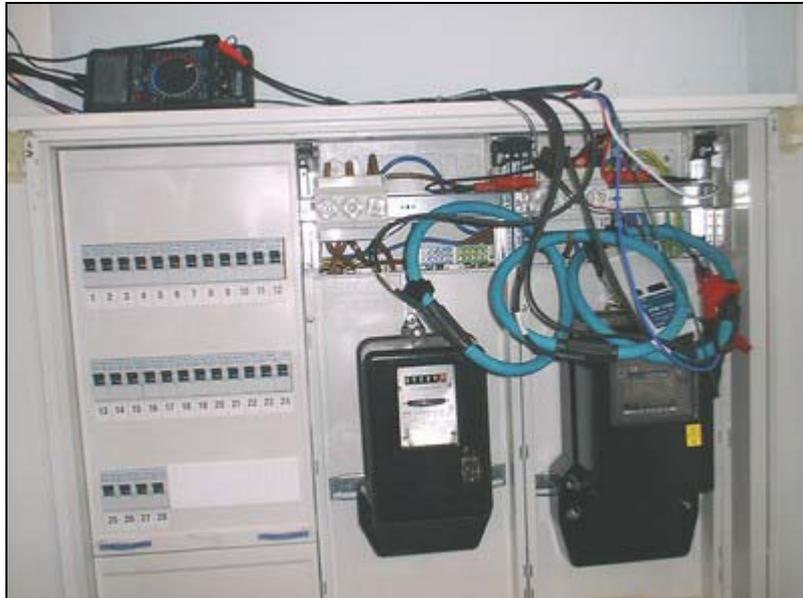
Die Außentemperatur ist aufgrund des Bedarfs an Heizwärme und des damit verbundenen Stromverbrauchs für die Heizungspumpen und Heizungssteuerung mitverantwortlich für den allgemein höheren Strombedarf im Winter.

Eine Informationsquelle waren die im Hausanschlusskasten (HAK) installierten Haupt- und Nebenzähler sowie die Stromrechnungen der vergangenen Jahre. Die Zählerstände dienten einmal zur Berechnung des Durchschnittsverbrauchs und zur Validierung unserer gemessenen Daten.

Ferner wurden sämtliche Verbraucher einschließlich der installierten Steckdosen erfasst. Mittels dieses Verfahrens lässt sich eine Worst-Case Betrachtung durchführen und auftretende Spitzenverbräuche können u.U. einzelnen Großverbrauchern zugewiesen werden. Auch wurde versucht, das Lastprofil theoretisch zu konstruieren, um weitere Erkenntnisse über das Verbraucherverhalten zu gewinnen.

Schließlich wurde für die Messung ein Drei-Phasen Messgerät (von Reliable Power Meters) für eine Woche mit dem Hausanschlusskasten (Sicherungskasten) verbunden. Zusätzlich wurde eine Phase mit einer Strommesszange abgegriffen, die über ein Multimeter an einen PC angeschlossen war.

Die entscheidenden Informationen über den Strombedarf wurden über das Messgerät gewonnen. Es hat, in Intervallen von fünf Minuten, für jede Phase separat jeweils für Strom und Leistung einen Minimal-, einen Durchschnitts- und einen Maximalwert aufgezeichnet. Zudem hat es noch eine Reihe von weiteren Messdaten über die Stromqualität, evtl. Störungen, die Phasenwinkel usw. festgehalten, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Die erhaltenen Messwerte wurden auf Grund unterschiedlicher Fragestellungen zusammengefasst, aggregiert und gemittelt. Die anschließenden Grafiken versuchen auf diese Fragestellungen Antworten zu geben.



**Bild 2:** Anschluss des Messgeräts und der Strommesszange an den Hausanschlusskasten

Forsthaus (HAK) Gesamt Watt. Jan 24 2001 14:29:13  
 14:29 Jan 17, 2001 14:29 Jan 24, 2001  
 Probenzählung: 2016 Probenauflösung: 300,000

	Phase A			Phase B			Phase C		
	Min.	Durch.	Max.	Min.	Durch.	Max.	Min.	Durch.	Max.
14:30	202,445	785,185	2692,359	124,012	250,597	1295,853	176,362	218,303	1365,027
14:35	199,618	326,87	802,838	233,92	247,843	274,527	171,645	182,642	192,836
14:40	693,68	1375,591	3089,39	218,293	278,439	1763,51	152,818	214,901	1702,029
14:45	1199,474	1609,228	2020,251	94,962	222,154	509,397	41,142	109,586	448,358
14:50	141,455	536,286	1294,469	90,125	107,853	135,921	41,786	50,602	60,181
14:55	139,007	186,726	234,014	99,214	109,691	125,9	41,498	51,273	60,321
15:00	138,964	458,117	1188,744	93,397	108,289	130,924	38,878	62,357	1644,048
15:05	1061,165	1508,36	2935,074	89,1	103,763	122,613	104,379	114,892	129,394
15:10	740,971	1240,442	1745,506	93,494	104,274	120,958	109,033	118,211	127,217
15:15	137,154	283,54	833,297	96,517	108,672	124,527	108,482	117,586	127,559
15:20	132,016	312,705	1158,378	65,657	101,663	124,847	109,028	219,722	1912,768
15:25	1033,366	1087,371	2206,693	86,216	105,945	1482,928	159,297	183,619	1637,671
15:30	139,827	972,98	1137,343	84,054	97,838	125,698	155,224	166,408	218,292

**Tabelle 3:** Auszug aus dem Datenprotokoll des Drei-Phasen Messgeräts

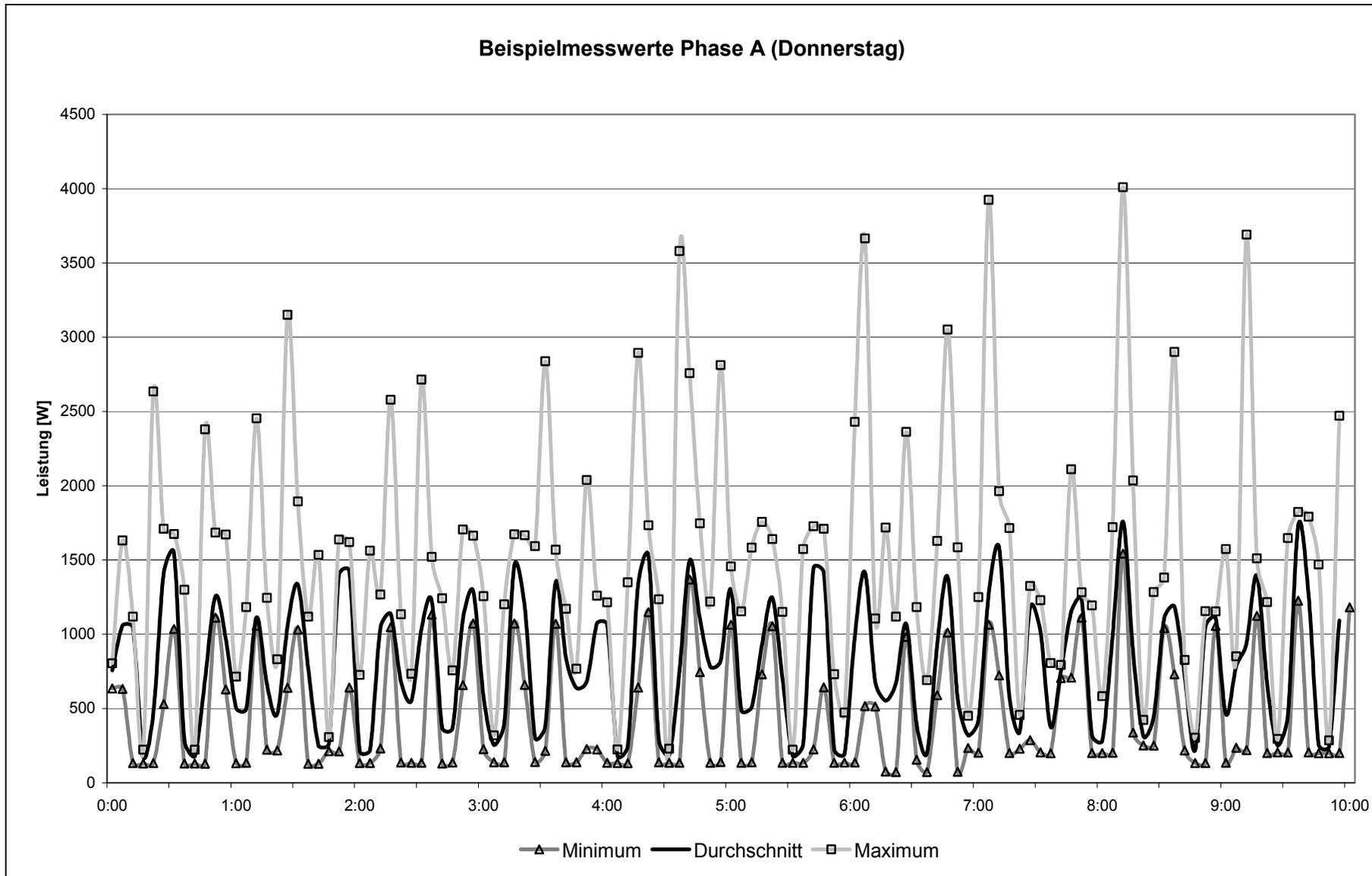


Abb. 11: Beispiel Messdaten

## 4.3 Analyse der Lastganglinien

### 4.3.1 Messwerte des Drei-Phasen Messgeräts

Wie oben schon beschrieben, wurde das Drei-Phasen Messgerät von Reliable Power Meters für sieben Tage mit dem Hausanschlusskasten verbunden. Für Strom und Leistung wurde für jede der drei Phasen separat jeweils in Intervallen von fünf Minuten ein Minimal-, ein Durchschnitts- und ein Maximalwert abgelegt. Dies sind je neun Messwerte pro Messzeitpunkt. Im Folgenden werden nur die Leistungsmesswerte betrachtet, da diese für das Stromversorgungssystem die primär entscheidenden Anforderungen darstellen. Die zugrundeliegende Datenmenge liefert leider nur eine schmale Datenbasis um umfassende Aussagen machen zu können. Dennoch ist es unseres Erachtens möglich, die Anforderungen an ein Stromversorgungssystem aus den vorhandenen Daten im Groben zu skizzieren.

### 4.3.2 Leistungsverlauf der einzelnen Wochentage

Für die folgenden Tagesgrafiken wurden die Messwerte der drei Phasen addiert, um den unterschiedlichen Verlauf an den einzelnen Tagen zu verdeutlichen.

In weiteren Rechenschritten sind die Daten zu Wochenende und Wochentag aggregiert und Mittelwerte gebildet worden. An Hand dieser Mittelwerte lässt sich das Lastprofil erkennen.

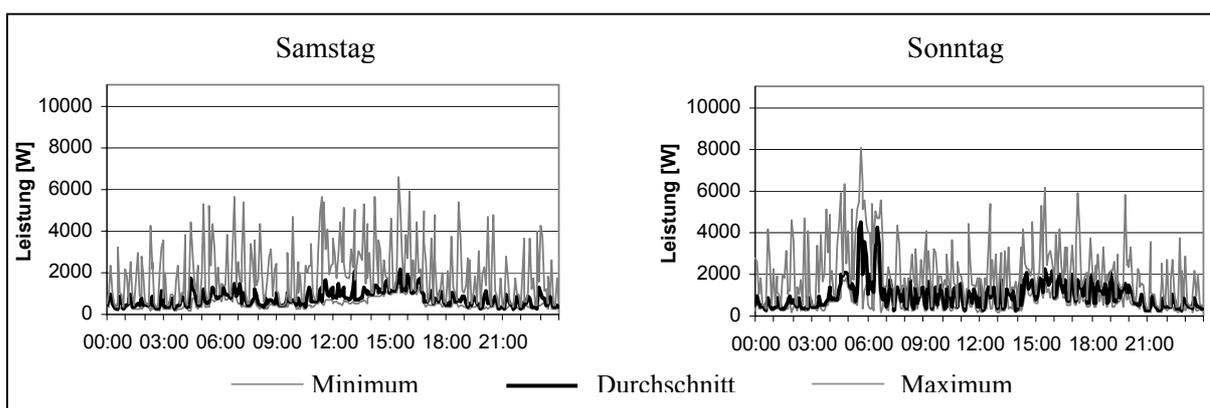
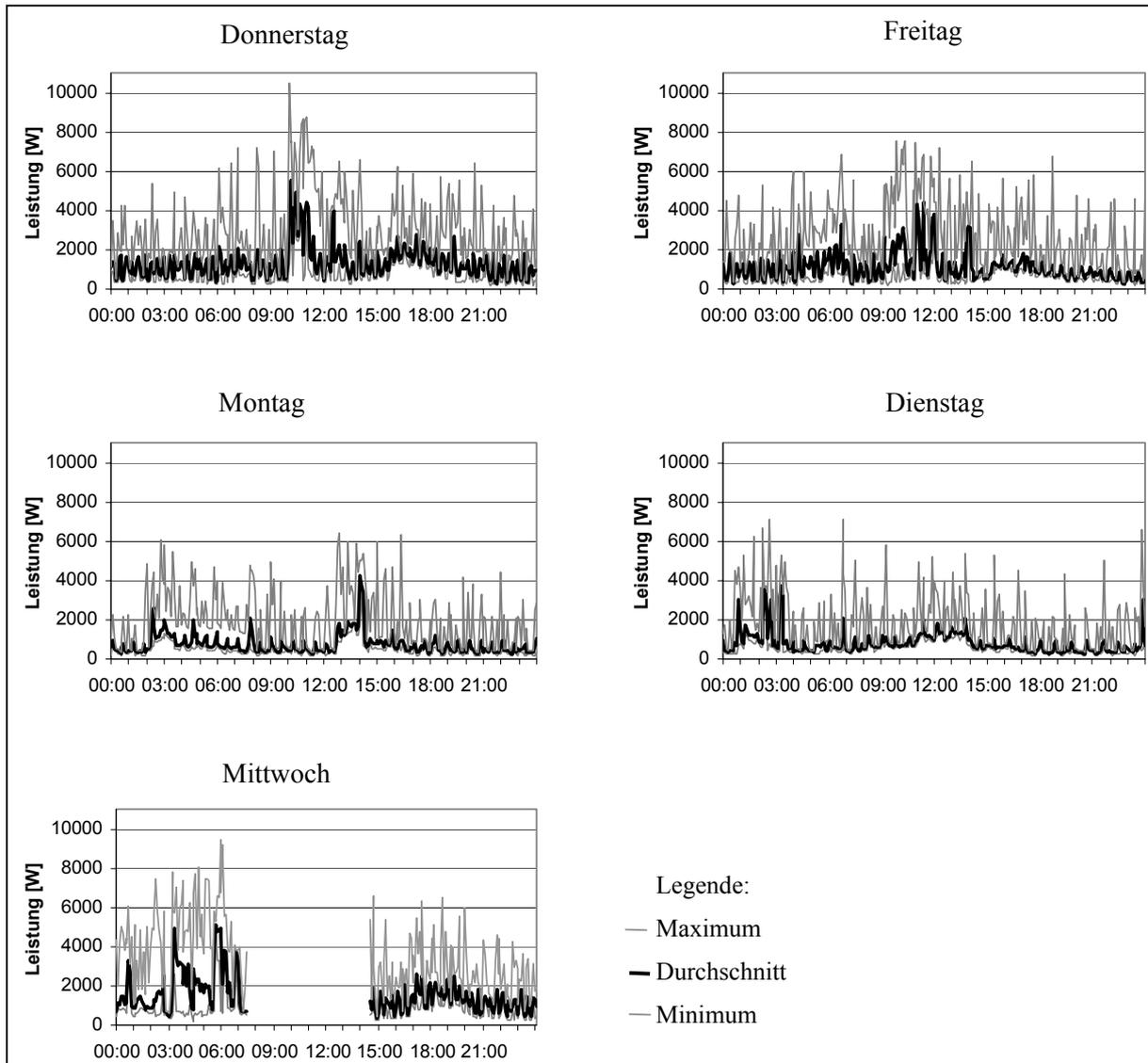


Abb. 12: Summe aller Phasen an Samstag und Sonntag

**Abb. 13:** Summe aller Phasen an Wochentagen



### 4.3.3 Analyse der Leistungsverläufe an den einzelnen Wochentagen

An Hand der Leistungsverläufe lassen sich eine Reihe von Schlussfolgerungen ziehen. Zum einen sind die Daten für den Mittwoch unvollständig, daher bleiben bei den folgenden Durchschnittsprofilen die Mittwochsdaten unberücksichtigt. Weiter ist zu erkennen, dass die Leistung über die Woche sehr ungleichmäßig verteilt ist. Besonders am Dienstag zwischen 0:00 Uhr und 3:00 Uhr sind signifikante Abweichungen im Vergleich zu den anderen Wochentagen zu erkennen. Wir führen diese Abweichungen auf das Kalkzusatzgerät und die Wasserpumpe zurück, die alle 4 Tage nachts das gesamte Rohrleitungssystem spült.

Des weiteren fällt auf, dass sich der Leistungsverlauf am Wochenende bzw. während der Woche stark unterscheiden. Dies lässt sich auf das an Wochenenden veränderte Bewohnerverhalten zurückführen.

Zusätzlich findet sich der absolute Leistungsmaximalwert am Donnerstag gegen 10:05 Uhr mit rund 10,5 kW. Man kann davon ausgehen, dass es sich bei dieser Spitze, wie auch bei den meisten anderen, um Einschaltvorgänge handelt, die, wie eindeutig zu erkennen ist, nur sehr kurzfristig auftreten. Ein Stromversorgungssystem muss allerdings in der Lage sein, die volle Leistung auch kurzfristig zur Verfügung zu stellen und bei Bedarf sehr schnell hohe Ströme liefern. Es ist schwer, Vorhersagen über auftretende Spitzen zu machen. Nach unseren Messungen ist allerdings nicht mit Spitzen über 12 kW zu rechnen.

#### 4.3.4 Mittlere Leistungsverläufe

In den folgenden Leistungsverläufen finden die Mittwochsdaten keinen Eingang, da sie unvollständig sind, und daher die Kurven verfälschen würden. Für die Wochentage verbleiben somit die Daten von Donnerstag, Freitag, Montag und Dienstag. Wieder finden sich jeweils die Minimal-, Durchschnitts- und Maximalmesswerte über die drei Phasen addiert. Aus diesen aggregierten Daten lässt sich ein Lastprofil erkennen.

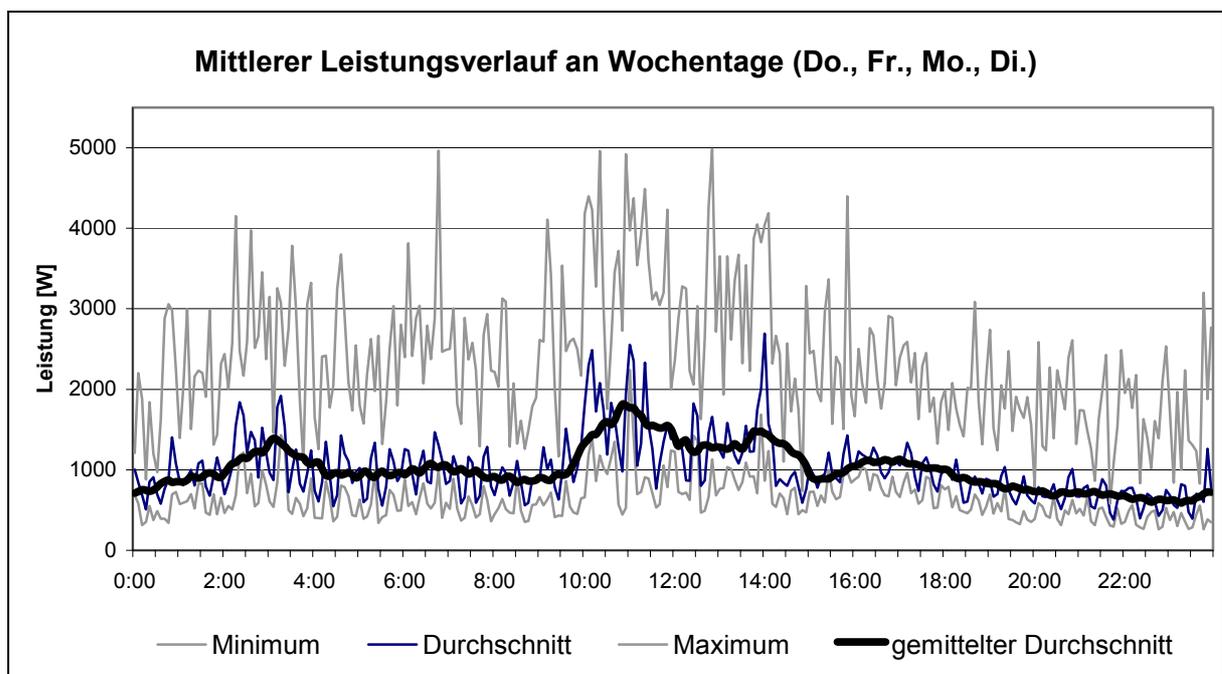


Abb. 14: mittlerer Leistungsverlauf an Wochentagen

Der gemittelte Durchschnitt kann auf der vorhandenen Datenbasis als typischer Leistungsverlauf für Wochentage für das Objekt betrachtet werden. Er bestätigt auch die Berechnungen des Durchschnittsverbrauchs von ca. 1 kW.

Im Gegensatz zu dem mittleren Leistungsverlauf an Wochentagen können aus dem mittleren Leistungsverlauf am Wochenende keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden. Der Vollständigkeit halber wird der mittlere Leistungsverlauf am Wochenende dennoch hier abgebildet.

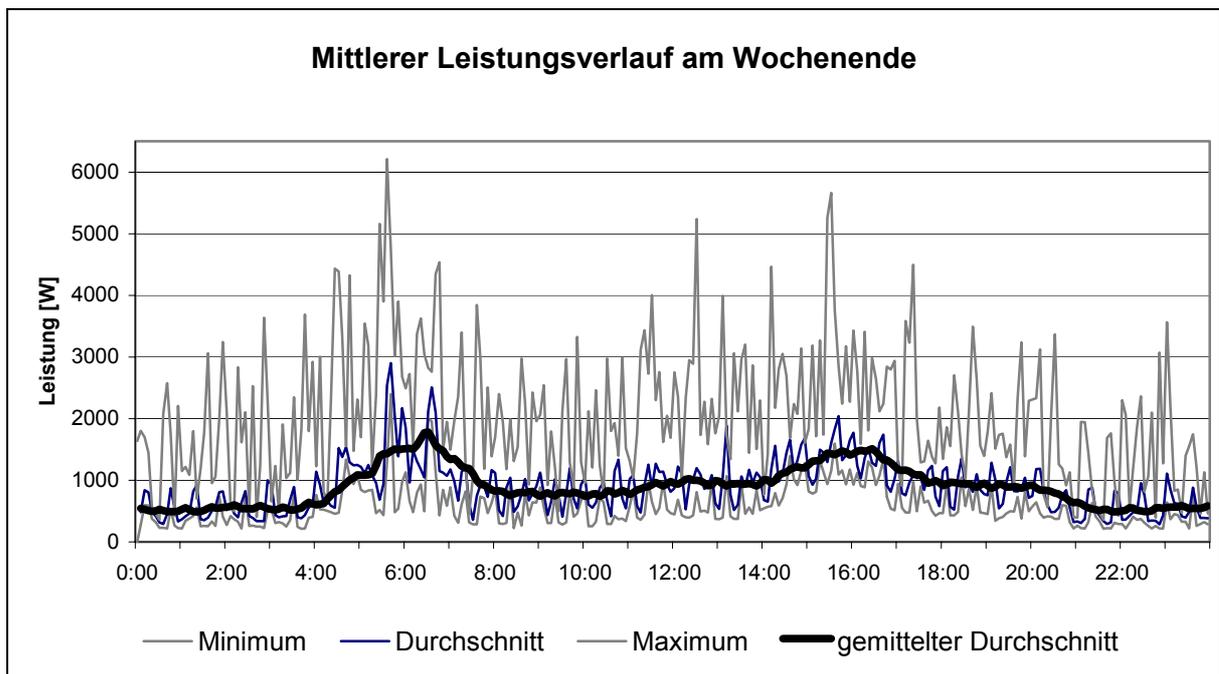
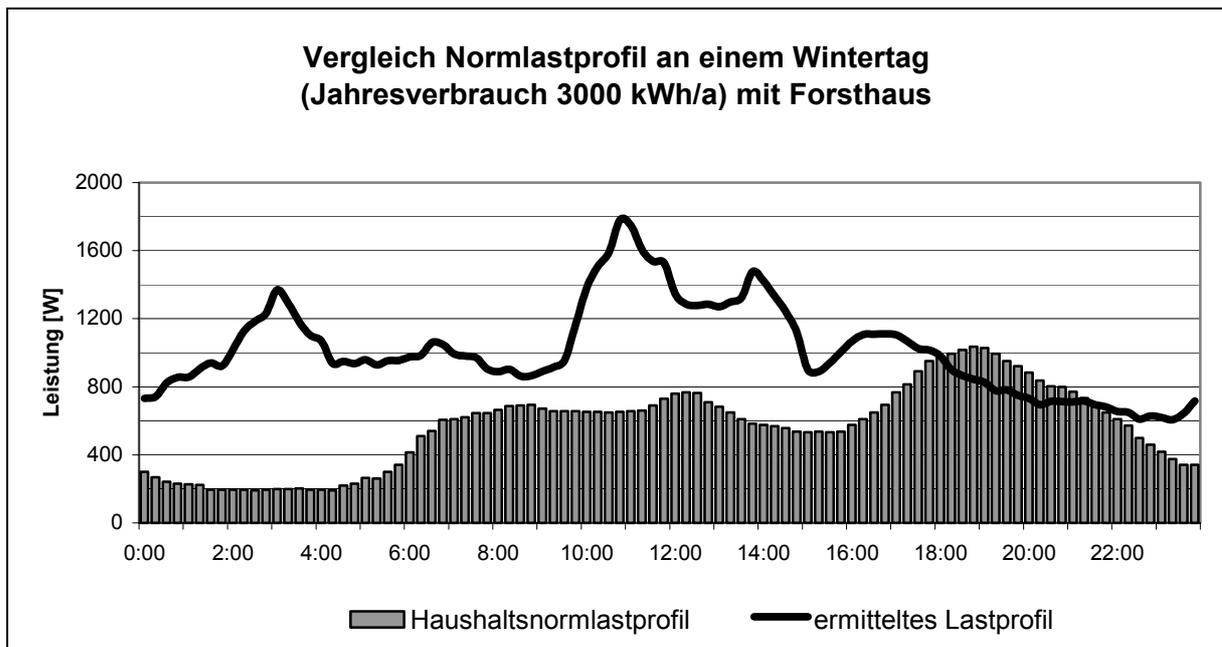


Abb. 15: mittlerer Leistungsverlauf am Wochenende

#### 4.3.5 Vergleich des Forsthauses mit einem Normlastprofil

Interessant schien noch der Vergleich des ermittelten Leistungsprofils mit einem Normlastprofil für Haushalte. Dieses Normlastprofil wurde auf 3000 kWh Jahresverbrauch hochgerechnet, was dem Verbrauch eines durchschnittlichen 4-Personenhaushalts entspricht. Es gibt Normlastprofile für Werktag, Samstag und Sonntage, jeweils für den Sommer, die Übergangszeiten und den Winter. Wir haben uns für das Normlastprofil eines Winterwerktags entschieden.

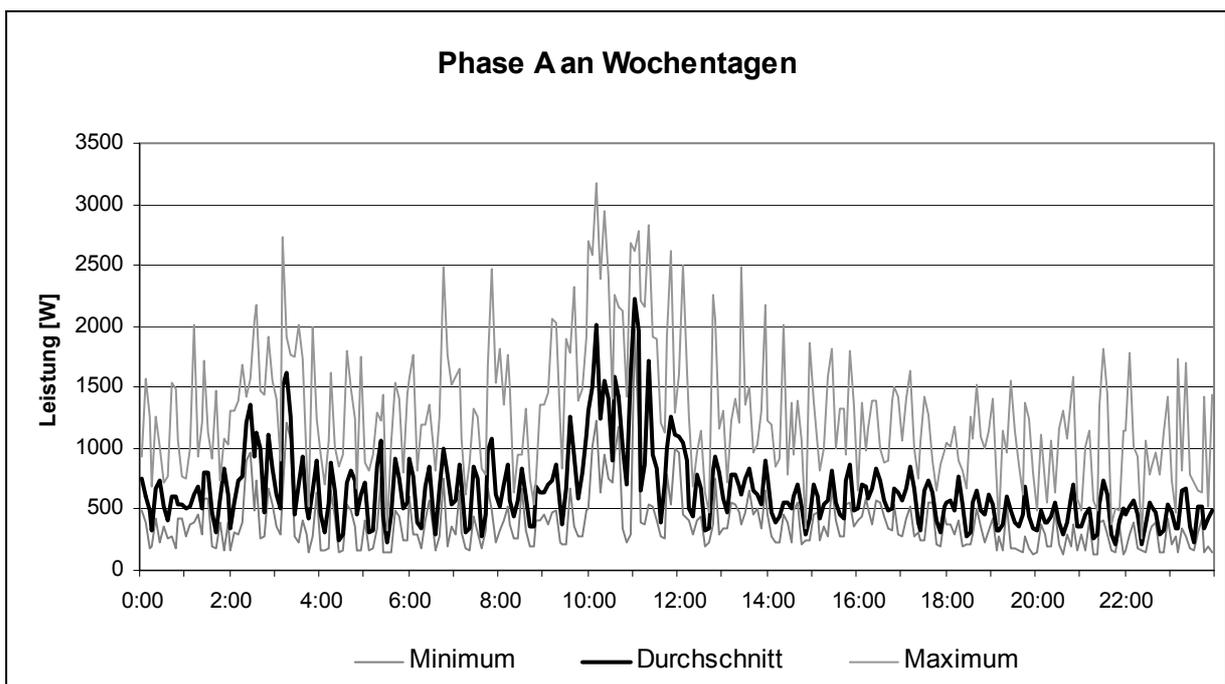


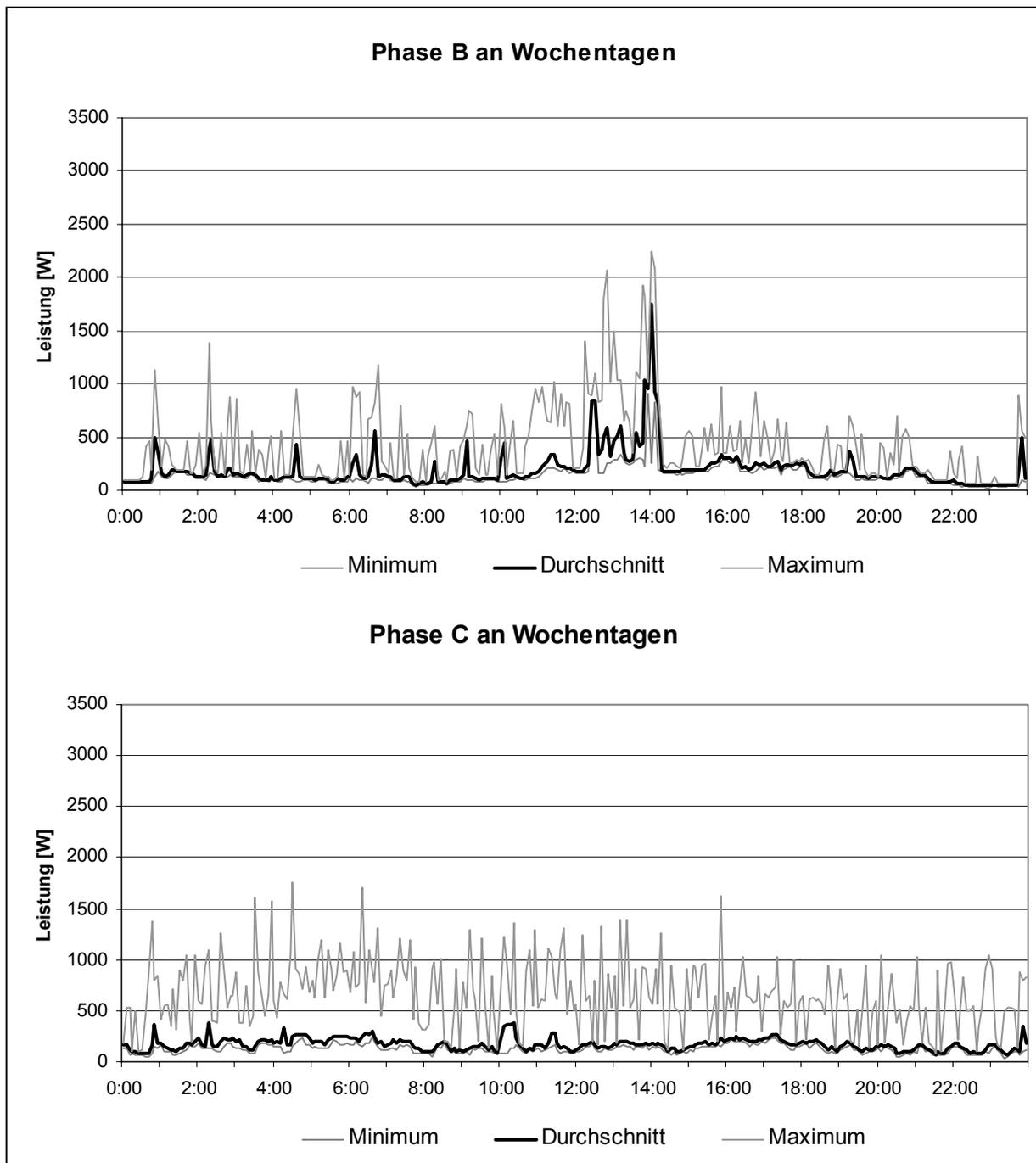
**Abb. 16:** Vergleich Normlastprofil mit ermitteltem Lastprofil

Deutlich lässt sich neben dem überdurchschnittlichen Leistungsbedarf des Objekts auch der atypische Verlauf des ermittelten Lastprofils erkennen. Die Ursachen hierfür sind vielschichtig. Wir verweisen daher auf die Ergebnisse dieses Kapitels.

#### 4.3.6 Phasenvergleich

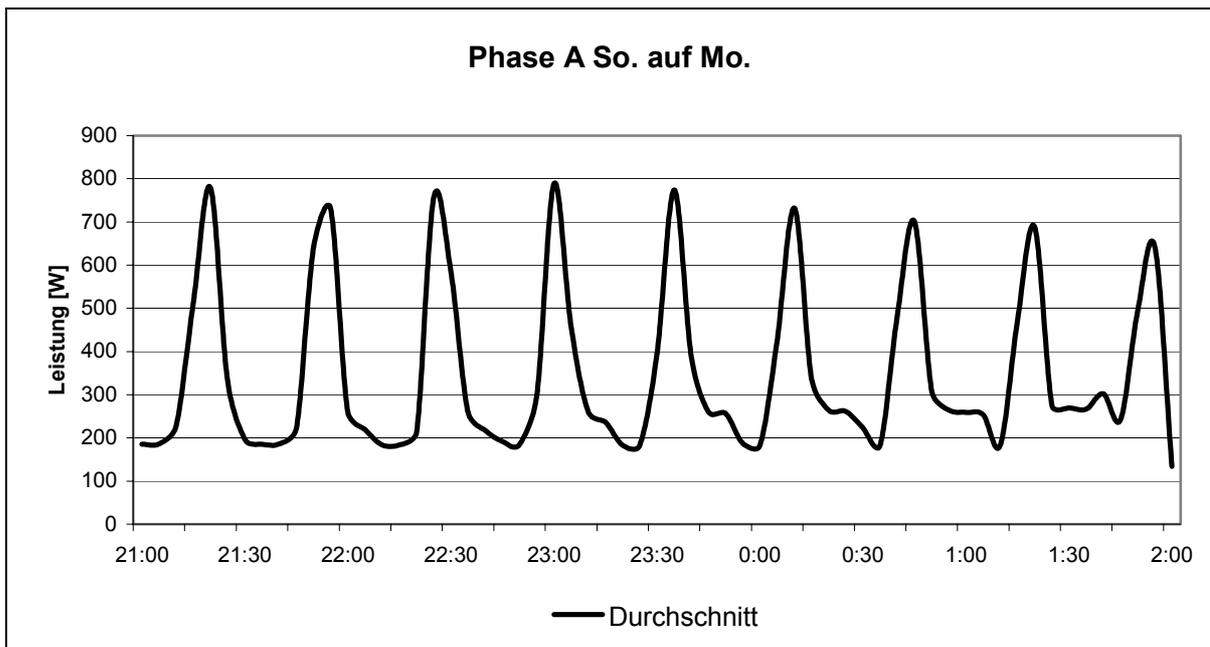
In den anschließenden Vergleichen der einzelnen Phasen lässt sich feststellen, dass die Phasen sehr unterschiedlich belastet sind.





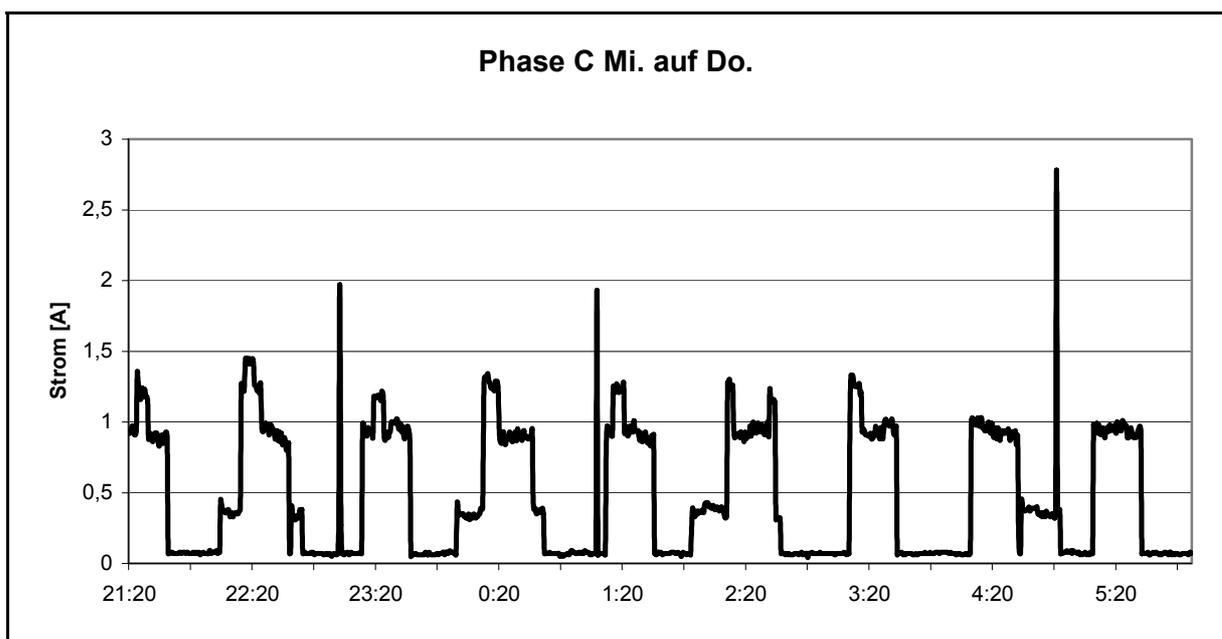
**Abb. 17:** Vergleich der einzelnen Phasen

Bei einer genaueren Betrachtung von Phase A lässt sich das angeschlossene Kühlaggregat mit seinen Ein- und Ausschaltvorgängen nachweisen. Da über diese Phase auch 2 Herdplatten und die Heizungspumpen (ohne Heizkörperumwälzpumpe) angeschlossen sind, werden die Signale des Kühlaggregats tagsüber v.a. mit diesen Verbrauchern und den üblichen Hausverbrauchern (Licht, Kleingeräte u.v.a.) überlagert. Besonders sticht dabei die Mittagszeit ins Auge. Die Abb. 18 zeigt die Ein- und Ausschaltvorgänge des Kühlaggregats, das mit ca. 600 W einen entscheidenden Anteil an dem mit 84 kWh hohen Verbrauch des Nebengebäudes hat.



**Abb. 18:** Verlauf dominiert von Kühlaggregat

Weiter fällt auf, dass vor allem Phase C nicht ein über den Tag variierendes Profil aufweist, sondern eher ein konstantes Verbrauchsbild zeigt. Dieses ist hauptsächlich durch den Kühlschrank bestimmt. Auch hier sind wieder gut die Ein- und Ausschaltvorgänge zu erkennen. Abb. 19 zeigt diese Vorgänge. Die Datenbasis dafür waren die mit der Strommesszange und dem Laptop ermittelten Werte. Dieser Messaufbau hat eine wesentlich höhere Auflösung und misst den Strom direkt.



**Abb. 19:** Verlauf dominiert von Kühlschrank

#### 4.3.7 Berechnung des Durchschnittsverbrauchs

Zur Berechnung des Durchschnittsverbrauchs wurden die Zählerwerte der Stromzähler und die Stromrechnungen der vergangenen Jahre herangezogen. Daraus ließ sich folgender Durchschnittsverbrauch ermitteln.

Datengrundlage Hauptzählerwerte vom 01.07.1999, 05.01.2000, 17.01.2001 und 24.01.2001:

Tabelle 4: Zählerstände und Durchschnittsverbräuche

Datum	Zählerstand	Durchschnittsverbrauch
01.07.99	190 kWh	
05.01.00	3279 kWh	
17.01.01	9650 kWh	
24.01.01	9823 kWh	
Verbrauch (total):	9633 kWh	119,77 kWh
Verbrauch (Jahr):	6370 kWh	120,86 kWh
Messwoche:	174 kWh	

Man kann von einem allgemeinen Durchschnittsverbrauch von 120 kWh pro Woche ausgehen. Zu beachten ist dabei, dass der allg. Winterdurchschnitt um ca. 150% über dem allgemeinen Jahresdurchschnittsverbrauch liegt. Um ein ganzjähriges, zuverlässiges Funktionieren des Stromversorgungssystems zu gewährleisten, wird von folgendem Durchschnittsverbrauch ausgegangen:

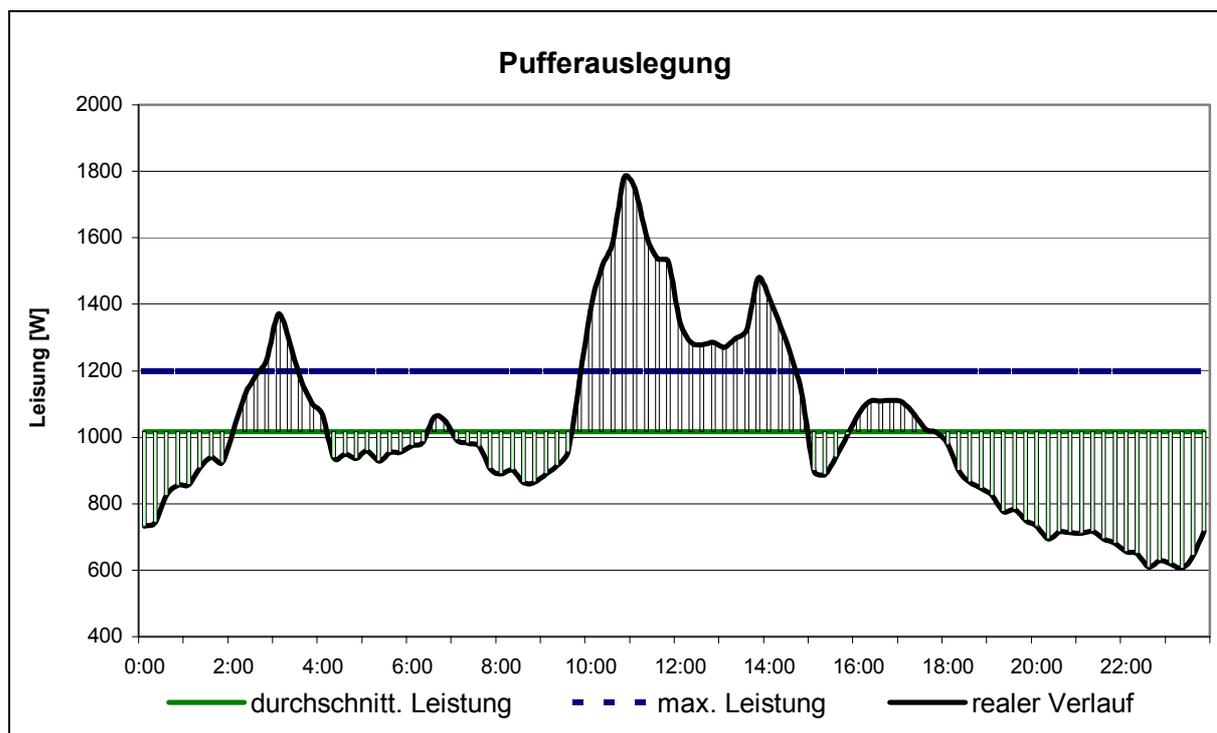
<b>120 kWh • 1,45 = 174 kWh</b>
---------------------------------

Aus diesem Wochendurchschnitt ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 1035 kW. Der sehr hohe Jahresverbrauch von ca. 6300 kWh liegt für einen 4-Personenhaushalt fast doppelt so hoch wie der eines durchschnittlichen 4-Personenhaushalts.

Ein Stromversorgungssystem sollte mit einer Sicherheitsmarge von 20% eine Dauerlast von ca. 1,2 kW zu leisten in der Lage sein.

## 4.4 Pufferspeicher und Systemanforderungen

Da ein Stromversorgungssystem nicht in der Lage sein kann den Leistungsbedarf, besonders in seinen Spitzen, nachzufahren, muss ein Speicher diesen Bedarf liefern. Der Speicher wird dann bei Niederlast wieder aufgeladen. Folglich muss er in der Lage sein, entsprechende Mengen Energie zu speichern und diese u.U. sehr kurzfristig zur Verfügung zu stellen. Folgende Grafik veranschaulicht wann der Speicher ge- bzw. entladen wird und welche Energiemenge er zu speichern in der Lage sein muss.



**Abb. 20:** Positiv/Negativ Abweichungen von durchschnittl. Leistung des Stromerzeugers [BOCK99]

In den Zeiten, in denen der reale Verlauf unter der durchschnittlichen Leistung des Stromerzeugers liegt, wird der Puffer geladen. Dies ist besonders abends und nachts der Fall. Analog dazu wird er in den Zeiten, in denen der reale Verlauf über der Leistung des Stromerzeugers liegt, entladen. Die schraffierten Flächen geben die Energie an, die der Puffer zu speichern bzw. zu leisten in der Lage sein muss. Im Idealfall entsprechen sich positive und negative Flächen. Hier sind es ca. 2,5 kWh.

Der Speicher für das Objekt Forsthaus sollte daher in der Lage sein 3 kWh aufzunehmen. Damit könnte er die maximal gemessene Spitze von 10,5 kW ca. 15 min. lang halten.

## Zusammenfassung: Anforderungen an ein Stromversorgungssystem

Dauerlast (Leistung)	1,2	kW
Pufferspeicher	3	kWh
Spitzenlast (Spitzenleistung)	12 nicht länger als 1 min.	kW

Tabelle 5: Anforderungen an ein Stromversorgungssystem

## 5 Dimensionierung

### a) Systemgröße

Bei der durchgeführten 3 – phasigen Strommessung konnte man einen Verbrauch von 173 kWh in einer Winterwoche für das Forsthaus Morschbacher Hof ablesen, was dem doppelten eines normalen Haushaltes entspricht. Von diesen 173kWh entfallen alleine 84 kWh auf das Nebengebäude mit Heizanlage (Pumpen) und Kühlzelle. Pro Tag werden 24 kWh verbraucht, wobei die mittlere Leistungsaufnahme bei 1 kW liegt und gemittelte Leistungsspitzen von 5 kW zu erkennen sind. Ebenfalls zu erkennen ist, dass das System reale, kurzzeitige Spitzen über 10 kW verkraften muss.

Für das beschriebene Objekt würde daher eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von 1.2 kW kombiniert mit einer Batterie von 3 kWh (als Puffer) eine Versorgungsmöglichkeit darstellen. Hierbei deckt die Brennstoffzelle den mittleren Verbrauch ab, und hat noch Kapazität frei, um die Batterie aufzuladen. Die Batterie muss die kurzzeitigen extremen Anlaufspitzen von bis zu 10 kW erbringen können und durch Zuschaltung während der Koch- oder Waschphase die benötigte Zusatzleistung bereitstellen.

### b) Wasserstoffbedarf

Der bereits im allgemeinen Teil berechnete Wasserstoffbedarf für 1 kWh liegt bei 1077 Liter  $\approx$  1100 Liter Wasserstoff. Laut Herstellerangaben (Messer – Griessheim) ist die größte Handelseinheit von Wasserstoffflaschen 50 l, die unter einem Druck von 200 bar stehen. Dies entspricht ca. 10.000 l H<sub>2</sub> bei Umgebungsdruck (1 bar).

Aus einer Flasche lassen sich demzufolge 9,18 kWh Strom erzeugen.

Wird die Brennstoffzelle mit der in Kapitel 5.3.7. berechneten maximalen Leistung von 1,2 kW betrieben, reicht eine 50-l-Flasche gerade mal 7 Stunden. Bei einem allgemeinen Durchschnittsverbrauch von 120 kWh/Woche werden 13,07 Flaschen Wasserstoff benötigt. Der Verbrauch im Winterhalbjahr liegt bei 174 kWh/Woche [siehe Kapitel 5.3.7.] und der wöchentliche Wasserstoffbedarf beträgt 18.95 Flaschen für eine solche Woche.

## 5.1 Notstromversorgung als Alternative

Für das Forsthaus Morschbacher Hof in Weidenthal, das zudem am Knotenpunkt einer öffentlichen Stromversorgung liegt, würde es keinen Sinn machen, es von der gegebenen Versorgung abzutrennen. Der Förster, Herr Rahm, hat allerdings darauf hingewiesen, dass es des öfteren bei Stürmen auf Grund von Windbruch zu einer Unterbrechung der Stromversorgung kommt. Verschlimmert wird diese Situation dadurch, dass das Forsthaus mitten im Wald steht und es bis zur nächsten Ortschaft ungefähr 3 – 4 km sind.

In so einem Fall kann das Haus nicht beheizt werden, da die Pumpen der Heizungsanlage nicht mehr mit Strom versorgt werden können. Zudem versagt die Warmwasseraufbereitung des Hauses. Außerdem ist das Forsthaus aufgrund seiner Lage vollkommen von der Außenwelt abgeschnitten, da auch die ISDN – Kommunikationsgeräte ohne Strom nicht zu nutzen sind. Deshalb wird für das Forsthaus Morschbacher Hof eine Notstromversorgung vorgeschlagen, um zumindest die Wohnqualität zu erhalten, bis die übliche Stromversorgung wieder gewährleistet ist.

Bei einer Notstromversorgung müssten folgende Geräte mit Strom versorgt werden:

	Typenbezeichnung	angegeben	angenommen
Pumpen:			
Heizkörper	UPE 25 - 60	40 - 100 W	100 W
WW - Speicher	UPS 25 - 40	35 / 45 / 60 W	60 W
Primär WT	UPS 25 - 60	45 / 65 / 90 W	90 W
Zirkulation	Wilco Z 20 / 1	36 - 38 W	38 W
			288 W
Motor (Keller)			750 W

Tabelle 6: Angaben lt. Datenblätter Fa. Bachmann/Kaiserslautern aus Produktkatalog

Es gibt mehrer Möglichkeiten eine unterbrechungsfreie Stromversorgung zu gewährleisten, die nachfolgend für unser Objekt beurteilt werden müssen.

Möglichkeiten einer unterbrechungsfreien Stromversorgung:

- Durch ein zentrales USV – System
- Durch mehrere dezentral angeordnete USV – Systeme, mit denen jeweils ein individueller Verbraucher bzw. eine kleine Gruppe von Verbrauchern versorgt wird [WENZ99]
- Durch ein mit einer Brennstoffzelle gekoppeltes USV – System der Fa. Alstom / Ballard
- Durch ein Dieselaggregat

### 5.1.1 USV – Systeme

Unterbrechungsfreie Stromsysteme (USV – Systeme) kommen aus der Computerbranche und sichern den Strombedarf eines Rechners so lange, bis man seine Daten gespeichert hat. Diese Systeme wurden im Laufe der Zeit weiterentwickelt um auch Stromschwankungen, bzw. einen Stromausfall in der Industrie zu überbrücken.

Die hier genannten USV – Systeme bestehen grundsätzlich aus drei Teilen:

1. Batterie (Gerätebatterie)
2. Gleichrichter
3. Wechselrichter

Dabei läuft der Strom ständig durch das USV – System und der Gleichrichter lädt wenn erforderlich die Batterie auf. Die Anlagen dienen dazu, eine gesicherte Stromversorgung bei Netzausfall zur Verfügung zu stellen. Fällt das Netz aus, übernimmt das USV – System die Bereitstellung von Strom. Dabei entlädt sich die Batterie. Ein USV – System, allein könnte unsere Leistungen der vorne aufgelisteten Verbraucher problemlos abdecken. Problematisch ist jedoch, dass die Geräte nur von 7 bis maximal 60 Minuten überbrücken können, in dieser Zeit hat sich die Batterie vollständig entladen.

In unserem Fall ist davon auszugehen, dass die Heizungspumpen 8 Stunden am Tag in Betrieb sind. Die zum Heizungssystem gehörenden Pumpen laufen nicht alle gleichzeitig, aber auch

durch eine größere Dimensionierung der USV – Anlage könnte zwar eine Zeitverlängerung erreicht werden, da das System dann nicht immer unter voller Last arbeiten muss, allerdings ist es absolut nicht möglich einen Zeitraum von 8 Stunden sicherzustellen. Zu prüfen wäre ob durch Regelungstechnische Maßnahmen, eine Versorgung über ein USV System möglich wäre.

Der Motor im Keller, der die Trinkwasseraufbereitung regelt, läuft nur 1,5 Stunden am Tag. Auch dessen Bedarf könnte problemlos durch eine USV – Anlage gedeckt werden. Durch eine etwas größere Dimensionierung könnte ein USV – System auch diesen Motor 1,5 Stunden am Laufen halten. Durch Regelungstechnische Maßnahmen könnte man dann durch einen Handbetrieb der Pumpe bei Stromausfall den Wasserbehälter füllen, sodass die Wasserversorgung des Haushaltes für 1 bis 2 Tage gesichert ist.

Um den Betrieb der ISDN – Anlage bei Stromausfall eine Zeitlang zu gewährleisten reicht ein übliches Gerät, wie es für den Computerbetrieb verwendet wird, aus. Eine ISDN – Anlage benötigt eine Maximalleistung von 25 W. Ein UVS – System APC Smart UPS SU 700 hat laut Herstellerangaben eine Ausgangsleistung von 420 W und kostet 610,-DM. Durch die Überdimensionierung könnte man einen Zeitraum von max. 4 Stunden zur Kommunikation mittels der ISDN – Anlage nutzen.

### **5.1.2 USV – kombiniert mit einer Brennstoffzelle**

Bei der Recherche zum Thema USV – Systeme haben wir ein System der Fa. Alstom/Ballard entdeckt, dass mit einer Brennstoffzelle kombiniert ist. Dabei soll die USV – Einheit den Strombedarf so lange decken, bis die Brennstoffzelle die Stromversorgung übernehmen kann. Bei einem Gespräch mit Herrn Scheefer von der Fa. Ballard Generation/Frankfurt haben wir herausgefunden, dass die Mutterfirma Ballard Generation Systems/Kanada plant ein solches System bis 2004 auf den Markt zu bringen. Bis das System in Deutschland auf den Markt kommt, muss es zunächst zugelassen werden. Herr Scheefer wies darauf hin, dass das frühestens 2006 der Fall sein wird.

Die Entwicklung der Fa. Ballard soll für große Energieversorger hergestellt werden. Die Systeme sollen 60kW leisten, was für unsere Anwendung also viel zu groß ist. Herr Scheefer

ist aber der Meinung, dass es wohl mit der Zeit zu der Entwicklung kleinerer Systeme kommen wird. Es gilt also die Entwicklung abzuwarten.

Vorteil eines solchen Systems wäre, dass ein Wasserstoffreservoir von 9 Flaschen für das Forsthaus notwendig wäre. Dies würde mit einer Brennstoffzelle von 1,2 kW und einer Batterie von 3 kW zu einer kompletten Versorgung des Hauses von 48 h ausreichen.

Fazit:

Im Moment ist es technisch nicht möglich ein solches System zu installieren, da es noch nicht auf dem Markt ist, bzw. 2004 erst für Großanwendungen auf den Markt kommen soll. Es ist aber auf jeden Fall die Entwicklung dieser Systeme zu verfolgen, da sie bestimmt eine hervorragende Möglichkeit zur Notstromversorgung darstellen werden. In Zukunft sollen auch kleinere Module als die erste 60kW Einheit hergestellt werden, die dann optimal kombiniert werden können. Dazu wäre es notwendig die Entwicklung dieser Systeme, sowie der konventionellen Brennstoffzelle mehr zu fördern.

### **5.1.3 Dieselgenerator**

Zur Notstromversorgung bietet sich auch die Möglichkeit ein Dieselaggregat einzubauen. Bei dieser konventionellen Alternative könnte man das gesamte Haus ohne Probleme versorgen, da der Entwicklungsstand ausgereift ist und Aggregate jeder Größenordnung zur Verfügung stehen.

Für unser Forsthaus würde sich als Kernbestandteil ein Antriebsmotor des Typs F3M1011F, der Fa. Deutz anbieten, die weiteren Anlagenbestandteile sollen in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung inklusive der Kosten dargestellt werden.

Dieser hat einen spezifischen Kraftstoffverbrauch von:

- Bei Vol - Last = 217g/kWh
- Bei 3 / 4 Last = 220g/kWh
- Bei 1 / 2 Last = 233g/kWh

Diese Aggregate zur Notstromversorgung können sowohl mit Diesel – Kraftstoff, als auch mit Rapsöl betrieben werden.

Bei dieser Alternative ist zu beachten, dass der Kraftstofftank ausreichen groß gewählt wird, bezüglich der Dauer eines möglichen Stromausfalls. Zudem ist die Systemgröße zu beachten. Die Systemgröße ist abhängig, ob es zur Schalldämmung gekapselt ist oder nicht. Ohne Schalldämmassnahme wird benötigt, eine Raumlänge von 3,4 m, eine Breite von 2,5 m und eine Raumhöhe von 2,5 m. Mit Schalldämmung eine Raumlänge von 6,0 m, eine Breite von 4,0 m und eine Raumhöhe von 2,5 m.

## **5.2 Wirtschaftlichkeit**

### **a) Komplettversorgung mit einer Brennstoffzelle**

Eine Wasserstoffflasche kann man zu einen Preis von 0,71 DM/Tag mieten. Das entspricht einem Mietpreis für eine Flasche von 259,15 DM jährlich. Man erhält eine neue Flasche bei Abgabe der verbrauchten im Austausch. Die jeweilige Befüllung, bzw. der Austausch kostet 143,30 DM (lt. Angaben von Messer–Griesheim). Wie zuvor schon ermittelt, lassen sich aus einer 50-l-Flasche Wasserstoff 9,18 kWh Strom erzeugen, wodurch sich ein Preis von 15,61 DM/kWh ergibt.

Im Forsthaus würden also bei einem jährlichen Verbrauch von ca. 6300kWh Strom etwa 700 Wasserstoffflaschen von 50 l verbraucht werden. Vernachlässigt man die Befüllungskosten, hat man jährliche Kosten von ca. 100.310,- DM, die nur für den Wasserstoff anfallen würden. Zu diesen laufenden Kosten kämen auch noch die Investitionskosten hinzu, die sehr teuer sind, da es die Brennstoffzellen dieser Größenordnung bisher nur als Prototypen gibt. In Zukunft kann zum Beispiel durch den Einsatz von Propan, mit der zugehörigen Reformertechnologie, als Energiequelle die Speicherproblematik der großen benötigten Volumen entschärft werden. Propan besitzt hierbei den Vorteil, dass große Volumen kostengünstig flüssig gelagert werden können. Problematisch ist allerdings bei der Reformertechnik die Bedarfsrechnung, wie viel Propan man braucht um eine kWh zu erzeugen.

In Europa gibt es durch die Brennstoffzellen – Förderung im 5. Rahmenprogramm zunehmend politische Unterstützung für den Einsatz von Brennstoffzellen. In Deutschland werden ca. 100

Mio. DM pro Jahr (2001 bis 2003) eingesetzt zur Förderung innovativer Energie – Projekte, insbesondere zur Förderung von Brennstoffzellen. Bisher gibt es in einigen Bundesländern wie Baden – Württemberg, Bayern und Nordrhein – Westfalen Förderungen für die Ansiedlung von Brennstoffzellentechnik (Bau oder Prototypen).

Fazit:

Eine Brennstoffzelle ist für den hausüblichen täglichen Gebrauch im Moment noch nicht zu empfehlen, es sei denn es ist eine Erdgaszuleitung vorhanden und man hat keine Speicherschwierigkeiten. Grundsätzlich kann man sagen ist die Brennstoffzellentechnik eine Technik mit Zukunft, jedoch muss man im Augenblick noch die weitere Entwicklung abwarten.

#### **b) USV-Systeme**

Ob tatsächlich die tägliche Laufzeit der Einzelaggregate mittels regeltechnischen Maßnahmen gedeckt werden kann, sollte vor der Installation geprüft werden.

Die ursprünglichen Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung aus der Computerbranche sind für unsere Leistungen zu klein. Die weiterentwickelten System aus der Industrie, sind so groß, dass eine dezentrale Nutzung keinen Sinn macht, sondern nur eine zentrale Nutzung. Ist das System zentral angeordnet, so können alle elektrischen Geräte des Forsthauses betrieben werden, allerdings sollte man die Geräte und Lampen sparsam betreiben, da sich sonst die Überbrückungszeit verkürzt.

Die im folgenden genannten Systeme sind für unsere Verbrauchslast eigentlich völlig überdimensioniert, da die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Forsthaus bei 1 kWh liegt. Durch diese Überdimensionierung kann man allerdings eine Verlängerung der Überbrückungszeit erreichen. Da die USV – Anlage bei einer zentralen Anordnung innerhalb der Stromversorgung die gesamten elektrischen Anlagen des Hauses versorgen soll, muss ein 3-phasiges Gerät zur unterbrechungsfreien Stromversorgung installiert werden.

Dafür geeignet wäre beispielsweise das Gerät „Jovistar delta“ der Fa. Jovyatl. Das Gerät besitzt eine Eingangsspannung von 400/230 V, eine Ausgangsspannung von 400/230V.

Bei  $\cos \varphi$  von 0,8 leistet das Gerät 8,5 kVA.

Bei  $\cos \varphi$  von 1 leistet das Gerät 6,8 kW.

Ohne die Installationskosten kostet das Gerät 21.594,00 DM.

### c) Diesellaggregat

Eine auf einem Dieselmotor basierende Netzersatzanlage, die sich automatisch einschaltet bei Netzausfall, benötigt beispielsweise folgende Komponenten:

Pos.	Anlagenteil	Preis pro Stück DM	Menge	Gesamtpreis DM
1	<b>Knurz - Stromerzeuger Typ: D 18 - 4 DDME, Leistung 17,5 kVA</b> , mit ölgekühltem DEUTZ - Dieselmotor, Typ: F 3 M 1011 F, mit 1500 1/min, mit mechanischem Motordrehzahlregler, ausgelegt für Automatikbetrieb, eingebaut in eine Super - Schalldämmkapsel LWA < 90 dB (A), mit thermostatgesteuerten Heizung	11.850,00	1Stück	11.850,00
2	<b>Kfz - Bleibatterie</b> 12 V, 66 Ah	100,00	1Stück	100,00
3	Vollautomatische <b>Notstromsteuerung</b> Typ: NSST - K 1	2.130,00	1Stück (pauschal)	2.130,00
4	<b>Leistungs- und Steuerkabel</b> , je 15 m Länge mit Montagematerial zwischen Stromerzeuger, Notstromsteuerung und Hilfsantrieb	520,00	1Stück	520,00
5	<b>Zugluftjalousie</b> mit Motorbetätigung Maße : B 650, H 400 mm, in Verbindung mit Schalldämmkapsel	380,00	1Stück	380,00
6	<b>Wetter - und Vogelschutzgitter</b>	120,00	1Stück	120,00
7	<b>Abluftventilator mit Verschlussklappe</b>	350,00	1Stück	350,00
8	<b>Abgasleitung aus Edelstahlrohr - V 4 A</b>	120,00	1Stück	120,00
9	<b>Abgasrohrbogen aus Edelstahlrohr - V 4 A</b>	30,00	3 Stück	90,00
10	<b>Isolierung der Abgasleitung</b> , NW 50, mit 80 mm Mineralfaser und verzinktem Stahlblech	80,00	4 Meter (pauschale )	80,00
11	<b>Isolierung der Abgasrohrbogen</b> , wie Pos. 10	45,00	3 Stück	135,00
12	<b>Handflügelpumpe</b> mit 3 m Kunststoffschlauch	150,00	1 Stück	150,00
13	<b>Handscheinwerfer</b> mit eingebautem Ladegerät und NC - Batterie	110,00	1 Stück	110,00
14	<b>Lieferung, Montage, Inbetriebnahme je nach Örtlichkeit und Zubehör</b>	3.200,00	ca.	3.200,00
<b>Summe:</b>				19.335,00

Für die Erstellung dieses Angebotes bedanken wir uns bei der **Fa. Kirsch GmbH**  
**Biewerer Str. 231**  
**54293 Trier**

die uns dieses Angebot speziell auf die Bedürfnisse unseres Forsthauses erstellt hat.

**Fazit:**

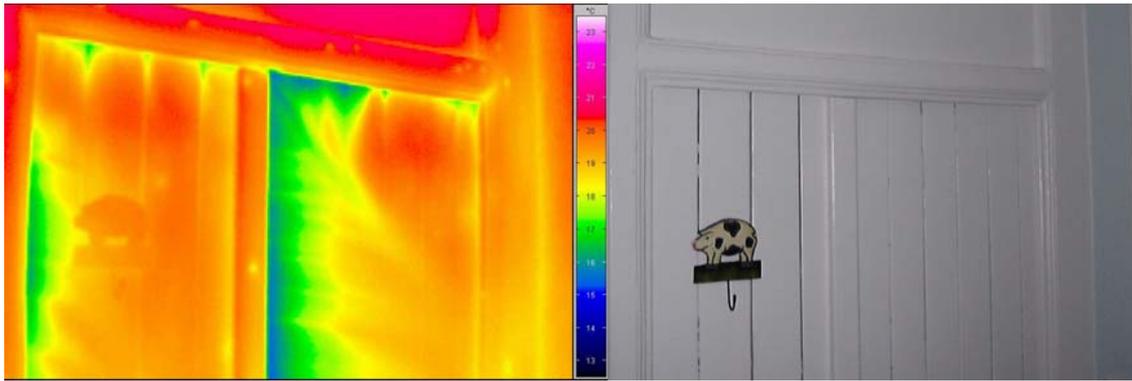
Soll direkt eine Notstromversorgung für das Forsthaus Morschbacher Hof aufgebaut werden, so empfehlen wir ein Dieselaggregat. Diese Technik stellte sich als günstigste Alternative heraus und ist zur Zeit bereits ausgereift. Ist ein System zur Notstromversorgung aktuell noch nicht geplant, schlagen wir vor die Entwicklung der Brennstoffzellen abzuwarten. Speziell schlagen wir allerdings vor später eine Prüfung auf den Einsatz einer Propan betriebenen Brennstoffzelle mit Reformertechnik, da sich die Speicherung für Propangas leichter verwirklichen lässt.

## 6 Schwachstellen bei der Hausisolierung

Mit Hilfe einer Thermographiekamera wurden von verschiedenen Bereichen des Hauses Aufnahmen gemacht, um Einsparpotenziale aufzudecken.

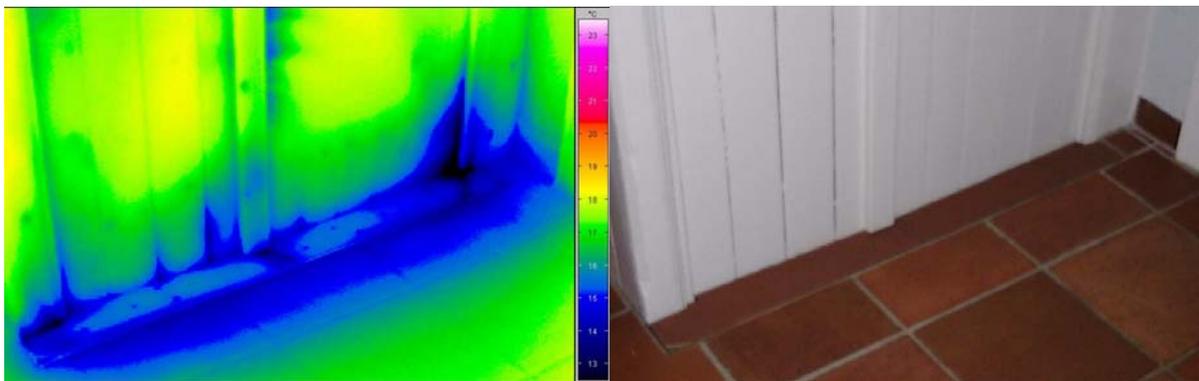
Dem folgenden Abschnitt sind einige Bemerkungen vorzuschicken: Die Kamera misst nicht direkt die Wärme eines Objektes, sondern dessen Strahlung. Die Abstrahlung eines Körpers wird mit dem Emissionskoeffizient  $\varepsilon$  ausgedrückt. Da jeder Körper etwas anders strahlt, müsste man jedem einzelnen Objekt seinen  $\varepsilon$ -Wert zuordnen, wobei ein sogenannter „Schwarzer Strahler“ als Referenz angenommen wird, der einen  $\varepsilon$ -Wert von 1 aufweist. Bei der Betrachtung des Hauses kann man jedoch einen  $\varepsilon$ -Wert von 1 annehmen, da beispielsweise Ziegelstein, Mörtel und Putz bei 0,93 sowie Holz bei 0,935 liegen. Daher sind die Temperaturskalen am Rand der Bilder nicht als absolut zu sehen, sondern als Näherungswerte. Bei der Annahme eines  $\varepsilon$ -Wertes von 1 kann es also leicht zu Trugschlüssen bei der Auswertung kommen. Wenn z. B. Metalle aufgenommen werden, erscheinen sie in einer völlig anderen Temperatur als der tatsächlichen. Poliertes Kupfer beispielsweise hat einen  $\varepsilon$ -Wert von 0,03. Das Thermographieren von Glas ist ebenfalls problematisch. In Glasscheiben wird die auftreffende Strahlung reflektiert. So kann es vorkommen, dass Gegenstände, die sich hinter der Kamera befinden, in der Scheibe zu sehen sind. Die Aufnahmen sind also stets kritisch zu betrachten und nicht als absolut korrekt anzusehen. Im Folgenden werden bestimmte Stellen des Hauses genauer betrachtet:

Eine der Hauptschwachstellen bei der Isolierung ist die Kellertür. Da der Keller nicht isoliert ist, muss die Kellertür den vollen Temperatursprung von nahezu der Außentemperatur zur Zimmertemperatur abgrenzen. Eine defekte Brandschutztür am Fuß der Treppe hatte man bei der letzten Renovierung entfernt. Dafür wurde eine dicke Isolierung an der oberen Tür angebracht, die zur Folge hat, dass diese nicht mehr in vollem Umfang geöffnet werden kann. Der Wärmedämmeffekt ist dennoch unbefriedigend. Es herrscht ständig ein kalter Luftzug an dieser Tür, was auch die Thermographiebilder belegen (siehe Bild 3). Zum Zeitpunkt der Messung herrschte eine Raumtemperatur von ca. 19 °C.



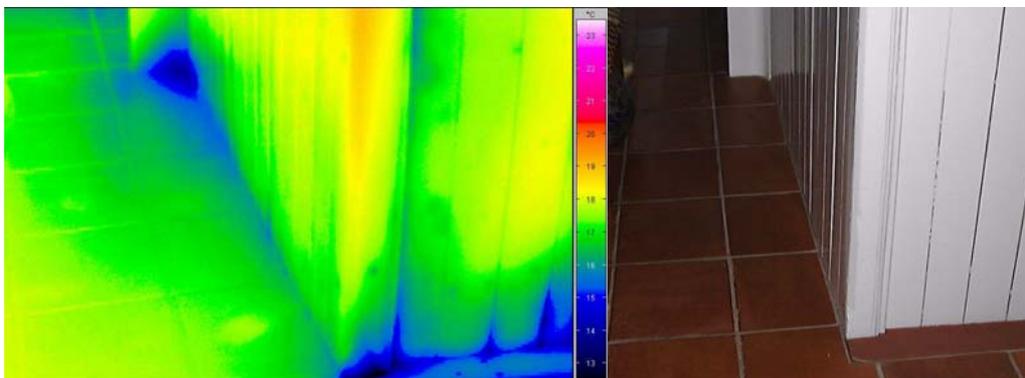
**Bild 3:** Kellertür oberer Bereich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Hierbei ist zu beachten, dass die Bilder 3 und 4 im gleichen Temperaturbereich dargestellt sind. Es ist deutlich zu sehen, dass von unten ein kalter Luftzug herrscht. An der Türspalte entsteht ebenfalls extremer Wärmeverlust.



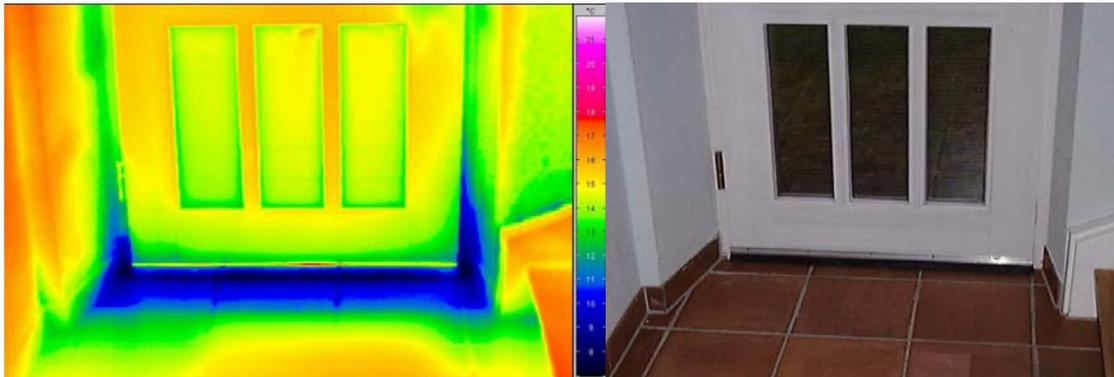
**Bild 4:** Kellertür unterer Bereich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Seitlich am Kellerabgang befinden sich kalte Stellen, die den Treppenbereich unangenehm auskühlen, was sich negativ auf das Wohlbefinden der Hausbewohner auswirkt.



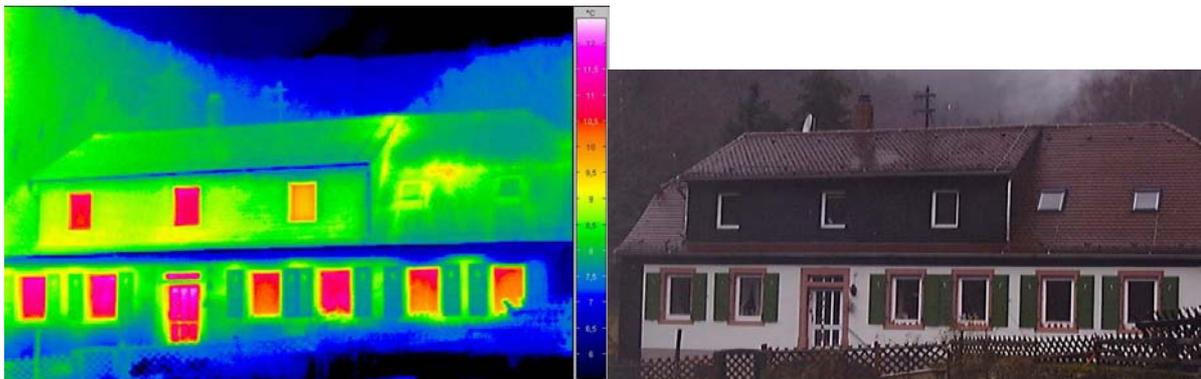
**Bild 5:** Kellerabgang seitlich (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Des Weiteren sind die Eingangstüren an der Vorder- und Hinterseite zu erwähnen, die beide an der Unterseite Spalten aufweisen, durch die die Kaltluft relativ ungehindert einströmen kann. Zwar wurden unten Besenleisten angebracht, die die Kaltluft abschirmen sollen, diese bringen den gewünschten Effekt aber nur in bedingtem Maße (siehe Bild 6). Hierbei sollte beachtet werden, dass die Aluminiumleiste durch die Annahme des  $\epsilon$ -Wertes von 1 nicht die angezeigte Temperatur hat, sondern verfälscht dargestellt wird.



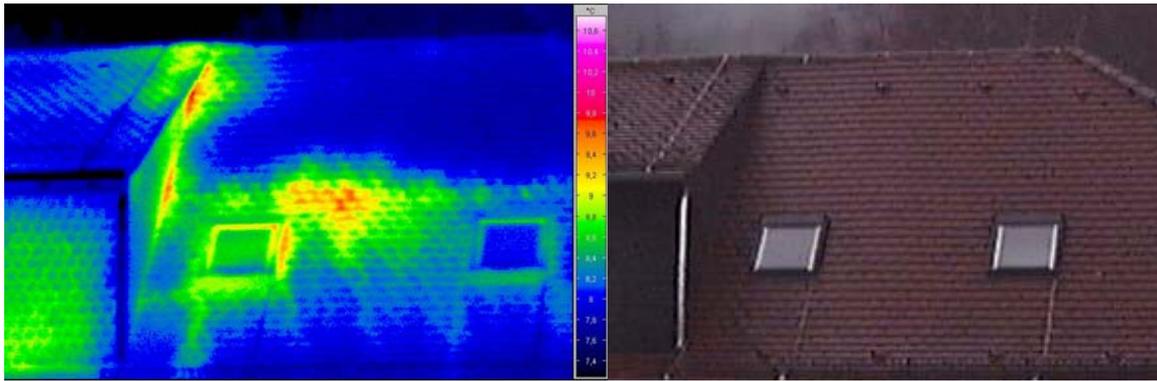
**Bild 6:** Hintertür (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Im nächsten Schritt soll das Haus von Außen betrachtet werden, um weitere Informationen über Schwachstellen bei der Isolierung zu erlangen. Die Außentemperatur am Tag der Messung betrug ca. 7 °C.



**Bild 7:** Ostansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Im Speziellen sollte hier die Isolierung im Bereich eines Dachfensters in dem nach Osten gerichteten Dach betrachtet werden. Die Thermografiebilder belegen eindeutig ein Temperaturgefälle zwischen diesem Bereich und dem Rest des Daches (siehe Bild 8). Außerdem weist der Übergang vom Dach zur Dachgaube einen deutlichen Wärmeverlust auf. Der Unterschied der beiden Fenster ist darauf zurückzuführen, dass das Zimmer hinter dem linken geheizt ist, während das Zimmer hinter dem rechten Fenster nicht geheizt ist.



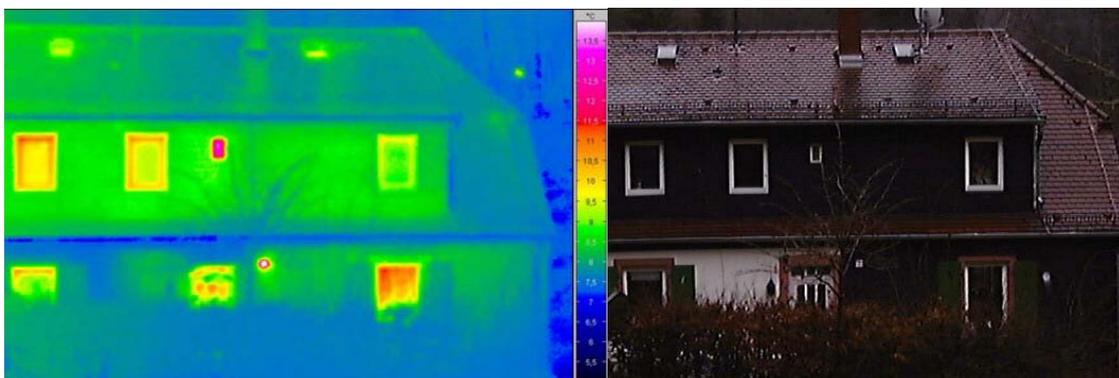
**Bild 8:** Dachfenster Ostansicht (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Betrachtet man sich die Westansicht des Hauses, lassen sich im Bereich des Dachfensters Ähnlichkeiten zu denen auf der gegenüberliegenden Seite feststellen.



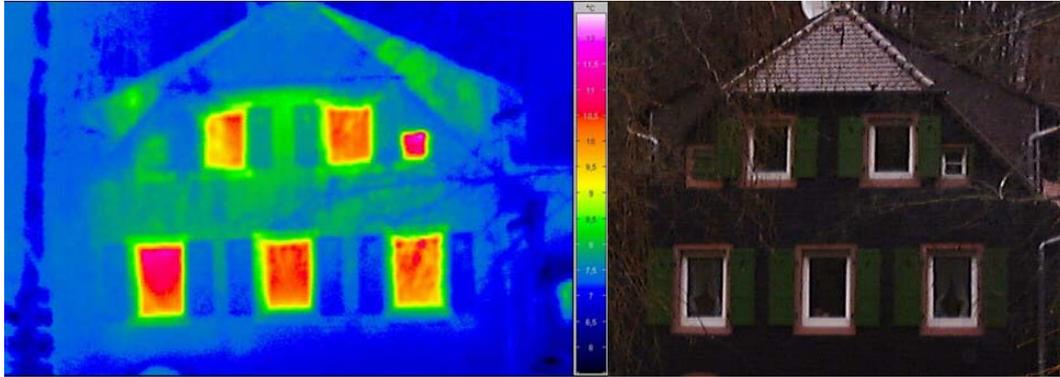
**Bild 9:** Westansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

In Bild 10 ist ein kleines Fenster zu sehen, das offensichtlich viel wärmer zu sein scheint als die anderen. Bei diesem Fenster handelt es sich um ein bei der Renovierung nicht ausgetauschtes Fenster. Es hat deutlich schlechtere Isoliereigenschaften als die moderneren Wärmeschutzglasfenster.



**Bild 10:** Westansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Bei der Betrachtung der Südansicht zeigt sich, ähnlich wie bei der Westansicht, der Wärmeverlust an einem nicht ausgetauschten Fenster. Die kleinen Fenster im Obergeschoss, rechts und links wurden nicht getauscht. Links ist der Klappladen geschlossen, daher ist hier keine Schwachstelle zu erkennen. Er verhindert in diesem Fall den Wärmeverlust sehr effektiv.



**Bild 11:** Ostansicht Morschbacher Hof (Temperaturangaben sind nur Richtwerte)

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Isolierung des Hauses einige Schwachstellen aufweist. Nun wäre zu prüfen, ob und wie es möglich ist, diese zu beseitigen. Konkrete Vorschläge hierfür wären:

- Einbau einer Tür im Keller
- Verbesserung der Abdichtung an Haustür und Hintertür
- Verbesserung der Isolierung im Dachbereich
- der Austausch der einfach verglasten Fenster

## 7 Diskussion

Grundsätzlich sollte man der Diskussion vorausschicken, dass die Studie auf einer relativ schmalen Datenbasis beruht. Um konkrete Aussagen über den Stromverbrauch zu erhalten wäre es notwendig, die Messdauer von einer Woche auf mehrere Monate (Winter und Sommer) zu erhöhen.

Als Ergebnis der durchgeführten Studie lässt sich festhalten, dass es ökonomisch nicht sinnvoll ist, das Forsthaus kontinuierlich autark mit einer Brennstoffzelle versorgen zu wollen. Zum einen steht das Haus direkt an einem Stromverteiler, so dass die Anbindung an das öffentliche Stromnetz gewährleistet ist. Zum anderen haben die Strommessungen gezeigt, dass das Haus einen überdurchschnittlichen Stromverbrauch aufweist (mit ca. 6300 kWh/a ist der Verbrauch fast doppelt so hoch wie der eines normalen Einfamilienhauses).

Dieser hohe Stromverbrauch bringt einen sehr hohen Bedarf an Wasserstoff mit sich, der eine sehr hohe Speicherkapazität erforderlich macht. Das Problem des hohen Wasserstoffbedarfs ließe sich durch eine Optimierung des Stromverbrauchs verringern. Dazu wäre es notwendig, das gesamte Verbraucherverhalten genauer zu prüfen. Ansatzpunkte hierfür wären:

- Ersatz älterer Geräte durch neuere, stromsparende Geräte
- evtl. Erneuerung der Kühlzelle
- Prüfung der Notwendigkeit aller bislang genutzten Geräte (sind 2 Kühlschränke notwendig?)
- allgemeines Verbraucherverhalten in Bezug auf den Stromverbrauch
- Energiemanagementgerät, das Leistungsspitzen reduziert

Eine Möglichkeit, ein Objekt dieser Größenordnung mit einer solchen Menge an Wasserstoff zu versorgen, wäre eine Anbindung an das öffentliche Gasnetz. Da dies nicht der Fall ist, müsste der Wasserstoff entweder mit Hilfe anderer Energien vor Ort erzeugt oder mit großem logistischem Aufwand angefahren werden. All diese Tatsachen widersprechen der Definition der Autarkie, da keine völlige Unabhängigkeit von anderen Versorgern gegeben ist.

Zum heutigen Zeitpunkt ist es aus ökonomischer Sicht noch nicht möglich, ein Inselsystem dieser Dimension völlig autark zu betreiben, denn dazu müsste die gesamte benötigte Energie

aus regenerativen Quellen stammen. Im Verlauf der Studie stellte sich jedoch heraus, dass es durchaus möglich wäre, die Versorgung kleinerer Objekte mit geringem Strombedarf zu realisieren, z. B.:

- kleinere Wanderhütten, die nur am Wochenende genutzt sind
- dezentrale Beleuchtungseinheiten
- Wetter- und Messstationen in Einödlagen
- evtl. Wohnmobile und Yachten
- Notstromversorgungen zur Überbrückung von Netzausfällen
- andere denkbare dezentrale Systeme mit niedrigem Energiebedarf.

Grundsätzlich wäre ein Vergleich zwischen den Investitionen einer Netzanbindung (eine Überlandleitung kostet ca. 15.000 DM pro km) und der Anschaffung eines Brennstoffzellensystems anzustellen. Da es sich bei Brennstoffzellensystemen um Pilotprojekte handelt, ist noch nicht definitiv abschätzbar, was ein solches System kosten wird. Andere regenerative Energiequellen wie Wind und Sonne sind für autarke Systeme wegen ihrer klimatischen Abhängigkeit nur in Kombination mit Brennstoffzelle oder anderen Speichersystemen sinnvoll.

Als Alternative zum Energieträger Wasserstoff wären Propangas und Methanol zu nennen. Solche Systeme sind allerdings noch in der Entwicklungsphase. Für beide Systeme sind zur Zeit noch Reformer notwendig. Für Methanol wird es in naher Zukunft eine Brennstoffzelle geben, die direkt mit Methanol betrieben werden kann. Ab einer gewissen Größe wird die Zelle allerdings unrentabel, da der Bedarf an Platin um ein Vielfaches höher ist als bei der PEMFC. Dies macht die Methanolbrennstoffzelle nach heutigem Stand der Technik nur für kleine Anwendungen sinnvoll.

Wie oben bereits festgestellt wurde, ist es nicht sinnvoll, die komplette Stromversorgung des Hauses über Brennstoffzellen abzudecken. Denkbar wären Systeme, die bei Netzausfall für eine gewisse Zeit zumindest die wichtigsten Systeme wie Heizung, Telefon und Wasserversorgung aufrechterhalten. Diese Geräte übernehmen im Falle einer Stromunterbrechung die Versorgung mit Strom. Als Alternative zu herkömmlichen USV – Systemen mit Batteriebetrieb wäre zukünftig auch eine Brennstoffzellenlösung denkbar. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist dies noch nicht rentabel. Die gegenwärtige Problematik

bei der Brennstoffzellentechnologie besteht in der Wasserstoffspeicherung und –logistik. Desweiteren ist die Erzeugung von Strom aus regenerativen Energien sehr standortabhängig. Die Brennstoffzelle verspricht in Kombination mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Systemen zu werden. Um weitere Fortschritte auf diesem Gebiet zu erreichen, ist es unbedingt notwendig die Entwicklung politisch finanziell zu fördern.

Im vorliegenden Fall, sollten die vorhandenen Energieeinsparpotentiale, die in Kapitel 9 aufgeführt sind, ausgeschöpft werden. Außerdem wäre zu überlegen, ob herkömmliche USV – Systeme als Notstromlösung zu wählen sind, oder ob die Entwicklung in der Brennstoffzellentechnologie abgewartet werden sollten, um diese dann einzusetzen.

## **8 Energieeinsparungspotenziale**

- Prüfung der Notwendigkeit aller Geräte
- Einsatz energieparender Geräte
- Stromsparlampen
- bessere Isolierung:
  - Kellertür
  - Haustür
  - Hintertür
  - Dach
- Austausch älterer, einfach verglaster Fenster
- Prüfung des allgemeinen Verbraucherverhaltens
  - viele standby-betriebene Geräte (TV, PC, Stereo Anlage)
  - Große Stromversorger nicht gleichzeitig betreiben (Waschmaschine, Trockner, Geschirrspüler)

## 9 Literaturnachweis

- [BOCK99] U. Bock und J. Nissen, Essen: „Standardisierte Lastprofile für Haushalte und Kleingewerbe“  
Energiewirtschaftliche Tagesfragen; 49. Jg. (1999) Heft 9; S. 607
- [CERB90] Cerbe/Hoffmann, Einführung in die Wärmelehre, 9. verbesserte Auflage (1990), Carl Hanser Verlag München,
- [DAIS01] <http://www.Daisanalytic.com>
- [ENER01] <http://www.energypartners.org>
- [ERGE01] <http://www.ergenics.com/hsto.htm>, <http://www.ergenics.com/st90.htm>
- [FUEH 98] Führer, K.Heidemann, W. Nerreter, Grundlagen der Elektrotechnik, B, Band 2: Zeitabhängige Vorgänge, 6. Auflage (1998), ISBN 3-446-19068-6, Carl Hanser Verlag München, Wien
- [HGC01] [http://www.hgc-hamburg.de/neue\\_technologien/index.html](http://www.hgc-hamburg.de/neue_technologien/index.html)
- [HOOG00] G. Hoogers, Brennstoffzellen – Motoren der Zukunft, Phys. Blätter 56 (2000) , S. 54
- [HOOG99] G.Hoogers/L.Potter, Renewable Energy World 2 (1999) S.50
- [IKZ01] [http://www.ikz.de/art\\_2098/9820044.htm](http://www.ikz.de/art_2098/9820044.htm)
- [INNO01] <http://www.innovation-brennstoffzelle.de/h2/haupt3d.html>
- [KHAR97] Nikolai V. Khartchenko, Umweltschonende Energietechnik, 1. Auflage 1997, ISBN3-8023-1587-1, Vogel Fachbuch, Kamprath-Reihe
- [LARM00] James Larminie and Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons LTD, London 2000, ISBN 0471490261
- [NWPO01] <http://www.northwestpower.com>
- [RUHD96] Diplomarbeit Andreas Ruhdorfer (Online-Version: [www.ruhdorfer.de/diplomarbeit](http://www.ruhdorfer.de/diplomarbeit)), Überblick Potential und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der regenerativen Energien im Industrie,- Gewerbe- und Wohnungsbau (1996, TU München)
- [SCHA95] Diethard Schade, Energiebedarf, Energiebereitstellung, Energienutzung: Möglichkeiten und Maßnahmen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission (1995), ISBN 3-540-60173-2, Springer Verlag
- [VAILL01] <http://www.vaillant.com>
- [WENZ99] H. Wenzl, K. Sachs, Planung und Auswahl von USV-Anlagen (1999), ISBN 3-7723-4433-X, Franzis Verlag
- [WING01] <http://www.wingas.de>
- [XCEL01] <http://www.Xcellsis.com>