Dezentrale Energiegewinnung und Versorgung

Effizienter Einsatz von Ressourcen durch Optimierung eines Inselsystems am Beispiel der Rappensee Hütte 2.091 m

Photovoltaik - Projekt

Thomas Kempf

Matthias Gehling

Prof. Dr. Wolfgang Moré

Akademie für Erneuerbare Energien, Lüchow-Dannenberg

15. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 2

Tabellenverzeichnis 3

1. Einleitung 4

2. Umweltgerechte Energieversorgung von Berghütten 4

3. Inselsysteme – eine kurze Einführung 5

4. Beispiele moderner Inselsysteme 6

4.1 Neue Monta Rosa Hütte (2.883 m) 6

4.2 Mindelheimer Hütte (2.058 m) 10

5. Projekt Rappensee-Hütte (2.091 m) 10

5.1 Darstellung 10

5.2 Energieversorgung heute 11

5.3 Energiebedarf heute 13

6. Auslegung der Photovoltaikanlage im Gesamtsystem 16

6.1 Verschattungsanalyse 17

6.2 Schneelast 20

6.3 Elektrische Ausrüstung Hybridsystem 24

6.4 Intelligentes Inselmanagement 29

7. Effiziente Optimierung der vorhandenen Energieformen 32

7.1 Installation eines Stromspeichers 32

7.2 Option: Installation einer PV-Anlage 32

7.3 Auswirkungen und Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen 32

8. Wirtschaftlichkeit 34

9. Fazit und Empfehlungen 39

Literatur- und Quellenverzeichnis 41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Neue Monte Rosa Hütte 7

Abbildung 2 Schema Elektrische Versorgung Monte Rosa Hütte (Büchel, 2010) 8

Abbildung 3 CO_2-Äquivalente Monte Rosa Hütte 9

Abbildung 4 50 Jahre Energiebedarf in GJ Monte Rosa Hütte 9

Abbildung 5 Rappenseehütte von Osten 11

Abbildung 6 Ausschnitt AV Karte Allgäuer/Lechtaler Alpen West 11

Abbildung 7 Lastgang der Stromversorgung bei Volllast (±250 Gäste) 15

Abbildung 8 Lastgang der Stromversorgung bei Teillast/Durchschnitt (80-100 Gäste) 15

Abbildung 9 Satellitenbild des umgebenden Bergpanoramas (Standort Rappenseehütte) und die Projektion auf das Sonnenstanddiagramm 17

Abbildung 10 Hauptgebäude mit dahinterliegendem Nebengebäude 18

Abbildung 11 Draufsicht und perspektivische Seitanansicht 19

Abbildung 12 Einfluss von Nahverschattungen 19

Abbildung 13 Schneelastzonen Österreich (Kartenausschnitt) 21

Abbildung 14 Schneelast über Meereshöhe 23

Abbildung 15 Abgeknickte Module nach Schneelast (DGS, 2006) 23

Abbildung 16 Etwas besser montierte Module Starkenburger Hütte (Landau, 2008) 24

Abbildung 17 Inselsystem 3-phasig, Rappenseehütte (SMA Solar Technology AG, Michael Ebel, 2010) 26

Abbildung 18: Pelton-Turbine mit Schwungrad (Elektro-Mechanik Meisl GmbH, 2007) 28

Abbildung 19: Turbine mit Synchron-Generator vorne rechts, hinten Druckfallrohr mit rotem Absperrschieber (Elektro-Mechanik Meisl GmbH, 2007) 28

Abbildung 20 Beispiel für den Aufbau eines 3-phasigen modularen Inselnetzes (Kassler Symposium Energie-Systemtechnik, Bruno Burger, 1999) 29

Abbildung 21 Stromeinspeisung und Strombilanzen nach Energieträger 33

Abbildung 22 Aktuelle Energieversorgung 36

Abbildung 23 Zukünftige Energieversorgung - konservativ und ambitioniert berechnet 37

Abbildung 24 Kostenvergleich - aktuelle und zukünftige Energieversorgung 38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Stromverbraucher 14

Tabelle 2: Deckung des Tagesbedarfs aus Wasserkraft und BHKW 16

Tabelle 3: Übersicht über PV-Ausbeute und -Verluste..... 20

Tabelle 4: Rechenwerte für Schneelast nach OENORM 22

Tabelle 5: Technische Daten Strangwechselrichter SB 3000 HF 26

Tabelle 6: Grundsätzliche Unterschiede zwischen Synchron- und Asynchrongenerator .. 27

Tabelle 7: Technische Daten SMA Batteriewechselrichter Sunny Island 31

Tabelle 8: Investition Szenario 1..... 35

Tabelle 9: Investition Szenario 2..... 35

Tabelle 10: Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsberechnung..... 35

1. Einleitung

Was hat das Great Barrier Reef vor der Küste Australien mit den Allgäuer Alpen zu tun? Zwei absolut unterschiedliche Lagen mit Gegensätzen wie Wasser und Stein - Berge und Meer. Es gibt aber auch viele Gemeinsamkeiten der beiden äußerst empfindlichen Ökosysteme, in denen seltene Tiere und Pflanzen leben. Beide Gebiete stehen unter besonderem Schutz. Das Riff ist UNESCO Weltnaturerbe und hat damit einen außergewöhnlichen natürlichen Wert für die Menschheit. Das Naturschutzgebiet Allgäuer Hochalpen steht unter dem regionalen Schutz der Regierung von Schwaben und des bayerischen Naturschutzgesetzes. Beide Gebiete sind besonders gefährdet durch menschliche Erschließung wie durch Verkehr.

Die in diesen Tagen bekannt gewordene Havarie eines Öltankers im Korallenriff vor der australischen Küste ist eines von vielen Beispielen. Das höchst problematische Transportieren von Erdöl über die Weltmeere ist zum Normalzustand einer von fossilen Brennstoffen abhängigen Industriegesellschaft geworden. Besonders wenn diese Transporte aus Gründen der Profitmaximierung zu immer heikleren Missionen werden, steuern wir hinein in Ölkatastrophen, die unsere Weltmeere und ihre unwiederbringlichen Schätze zerstören.

Die Erkenntnis, dass wir Menschen in einem globalen, sich gegenseitig beeinflussenden System leben, ist durch Themen wie Klima und Entwicklung in den letzten Jahren in das Bewusstsein einer breiten Öffentlichkeit gedrungen. Umso erstaunlicher ist es, dass die Menschen mit ihrer Lebensweise, die sich eigentlich selbst schon überlebt hat, sich gar nicht oder nur sehr langsam von liebgewonnenen Gewohnheiten wie dem unbedachten, ungebremsten Konsum von Waren und Energie trennen können.

Eine Ausprägung der, in Anbetracht der weltweiten Probleme, immer noch viel zu zögerlichen Verhaltensänderung ist die in Deutschland langsam aber stetig fortschreitende Umstellung der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien.

2. Umweltgerechte Energieversorgung von Berghütten

Nicht ganz so gefährlich wie ein Öltanker in einem Korallenriff, aber durchaus als problematisch kann eine Berghütte in den Alpen gesehen werden. Allein die Lage von Berghütten verlangt nach einem sehr verantwortungsvollen Umgang mit dem umliegenden Ökosystem, was sich durch eine umweltgerechte Ver- und Entsorgung ausdrückt. So dürfte

die Rappensee-Hütte, wie sie heute existiert, im Naturschutzgebiet „Allgäuer Hochalpen" an diesem Ort gar nicht mehr gebaut werden und wird ausdrücklich als Ausnahme erwähnt: „…die Bewirtschaftung, Unterhaltung, Instandsetzung und Ersatzbauten im bisherigen Umfang am bisherigen Ort sowie naturverträgliche Erweiterungen, wenn sie im Verhältnis zum vorhandenen Gebäude angemessen sind, von … Rappensee-Hütte…" (Dörr, 1992)

Der Deutsche Alpenverein versucht als Natur- und Bergsportverband dieser Situation damit gerecht zu werden, die Hütten so zu bewirtschaften, dass eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Natur von ihnen ausgeht. Zu den Werten, die er im Interessen seiner Mitglieder vertritt, gehören laut dem 2001 verabschiedeten Leitbild ausdrücklich: „… einem nachhaltigen Natur- und Umweltschutz - besonders im Gebirge und bei den Hütten und Wegen." Bei dem „Erhalt der Hütten wird auf umweltfreundliche Materialien und Technologien geachtet…" (DAV, Leitbild, Deutscher Alpenverein e.V., 1991)

Diesen Weg verfolgen auch die Alpenanrainerstaaten: In der von allen 8 Staaten 1991 ratifizierten Alpenkonvention legen sich die Länder auf eine grenzübergreifende Politik der Nachhaltigkeit im Alpenraum fest. In diesem Vertrag wird unter anderem das Ziel festgeschrieben, eine „natur- und landschaftsschonende sowie umweltverträgliche Erzeugung, Verteilung und Nutzung der Energie durchzusetzen und energieeinsparende Maßnahmen zu fördern" (Alpenkonvention, 1995)

3. Inselsysteme – eine kurze Einführung

Es wird also nach Energieversorgungssystemen gesucht, die ihre Energie möglichst aus natürlichen Ressourcen wie Sonne, Wind und Wasser erzeugen und dabei autark, also nicht an ein öffentliches Netz angeschlossen sind. Beispiele für solche Inselsysteme sind einzelne Häuser in abgelegene Dörfern etwa in Afrika, sogenannte Solar Home Systeme. Weiterhin gibt es Inselsysteme als Parkuhren, Hinweistafeln im öffentlichen Raum sowie in Form von ÖPNV-Haltestellen. Aber selbst im dicht besiedelten und gut versorgten Europa liegen noch 300.000 Häuser abseits der öffentlichen Versorgungsnetze. (EU-15 Stand 2003) (Kaltschmitt, 2006)

Ein ganz typisches Einsatzgebiet von Inselsystemen in diesem Zusammenhang sind Berghütten. Wie an allen anderen abgelegenen Orten kamen hier in der Vergangenheit fast ausschließlich Dieselaggregate zum Einsatz. Fossile Brennstoffe wie Diesel beeinträchtigen jedoch, wie oben beschrieben, beim Transport sowie bei Lagerung und Verbrennung die Umwelt und die Ressourcen. Auch sind diese Energieträger nicht unbegrenzt vorhanden. Auf vielen Hütten haben sich deshalb mittlerweile Hybridsysteme etabliert. Das sind verschiedenste Kombinationen aus Pflanzenöl-BHKWs mit Wasserkraft, Wind und Photo-

voltaik. Den meisten Hütten fehlt aber eine geeignete Vernetzung dieser Systeme. Oft fehlt es auch an dem notwendigen Wissen und der Erfahrung. Eine Optimierung vorhandener Systeme sowie ein aktives Monitoring und Management kann zu einem ressourcenschonenden und effektiven Energieverbrauch führen.

Im Folgenden sollen Beispiele funktionierender Hybridsysteme als Stand der Technik und Best-Practice Beispiele dem Ist-Zustand der Rappenseehütte gegenübergestellt und verglichen werden. Die Installation eines komplett vernetzten Hybridsystems wäre genauso wie eine Verbesserung der gebäudetechnischen Ausrüstung in Richtung einer umweltfreundlicheren und energiesparenderen Technik für den Standort wahrscheinlich notwendig oder zumindest wünschenswert. Dabei sind nicht nur die weiter unten beschriebenen aktiven, sondern vor allem auch passive Maßnahmen wie die Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Mit dem Schiestlhaus am Hochschwab (Touristenklub, 2010) (Wikipedia, 2010) und der Neuen Monte Rosa Hütte gibt es im Alpenraum mittlerweile Hütten mit Vorzeigecharakter im Passivhausstandard. Ein allzu umfänglicher Ansatz würde aber die Aufgabe und den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Darum soll im Weiteren die Optimierung eines vorhandenen Hybridsystems und die Erweiterung durch eine photovoltaische Anlage betrachtet werden.

Erklärtes Ziel ist es durch den Betrieb eines Solar-Generators und durch eine intelligente Nutzung der vorhandenen Stromerzeuger wie Kleinwasserkraft und BHKW fossile Energie einzusparen. Den Verantwortlichen vor Ort soll diese Arbeit als Entscheidungsgrundlage zur Modernisierung ihrer Energieversorgung dienen.

4. Beispiele moderner Inselsysteme

4.1 Neue Monta Rosa Hütte (2.883 m)

Etwa 270 km Luftlinie südwestlich von der Rappensee-Hütte liegt die neue Monte Rosa Hütte. Der Weg führt von Zermatt mit der Gornergratbahn Station Rotenboden und von dort in zweieinhalb Stunden zur Hütte. Sie ist seit 2009 fertiggestellt und ersetzt die nun stillgelegte alte Monte Rosa Hütte. Das Gebäude bietet Platz für 120 Bergsteiger und ist ein Gemeinschaftsprojekt der ETH Zürich und dem Schweizer Alpen Club SAC. Es wurde innerhalb von 6 Jahren von Studenten zusammen mit Industriepartnern entwickelt und hat Vorbildcharakter im Bereich Energie- und Ressourceneffizienz.



Abbildung 1 Neue Monte Rosa Hütte

Durch innovative Energie- und Gebäudetechnik kann sich die neuen Monte Rosa-Hütte zu 90 Prozent autark versorgen. Das geschieht durch Solarmodule, Kollektoren und mit einem ausgeklügelten Energiemanagementsystem. Überschüssige Energie wird in Batterien gespeichert. Dies garantiert eine lückenlose Versorgung auch bei bedecktem Himmel oder in der Nacht. Als ergänzende Stromquelle bei Spitzenlasten oder als redundantes System bei einem Ausfall der Photovoltaikanlage wird ein Blockheizkraftwerk eingesetzt, das Wärme und Elektrizität erzeugt. Das BHKW wird mit Rapsöl versorgt (ETH & SAC, 2008). Die Hütte kann unter energetischen Gesichtspunkten normalerweise nur als ganzheitliches System betrachtet werden. Es werden aber hier ganz bewusst die elementaren Bereiche Wärme und Wasser ausgelassen und nur die Versorgung mit elektrischer Energie betrachtet.

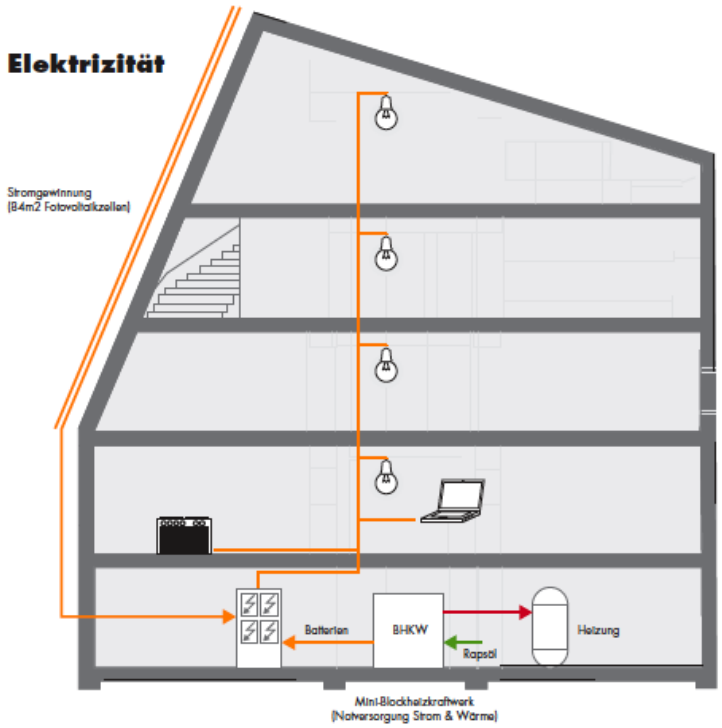

Abbildung 2 Schema Elektrische Versorgung Monte Rosa Hütte (Büchel, 2010)

Elektrische Energie

PV-Module: 84 m^2 ; 16,5 kW_p

Batterie: 250 kWh

BHKW: 8.5 kW_{el}

BHKW: 19 kW_{th}

Die Hütte trägt mit ihrem Gesamtkonzept aktiv zur Reduzierung von CO_2 Emissionen bei. Dies zeigt die folgende Grafik:

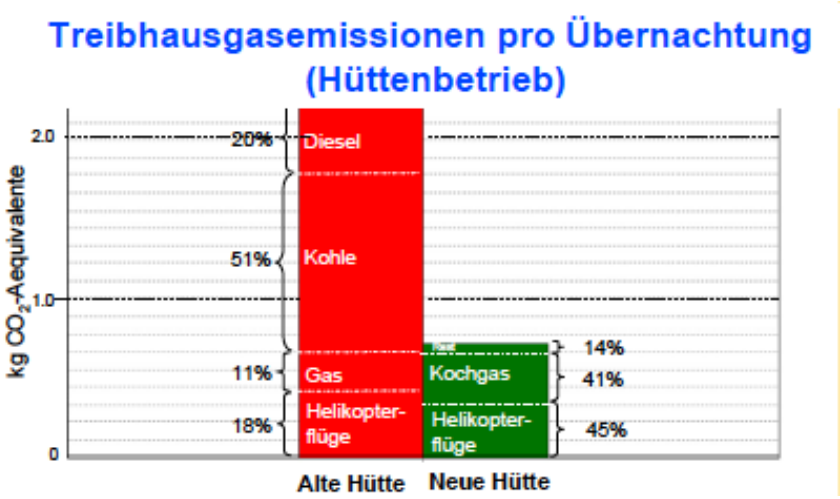

Abbildung 3 *CO_2-Äquivalente Monte Rosa Hütte*

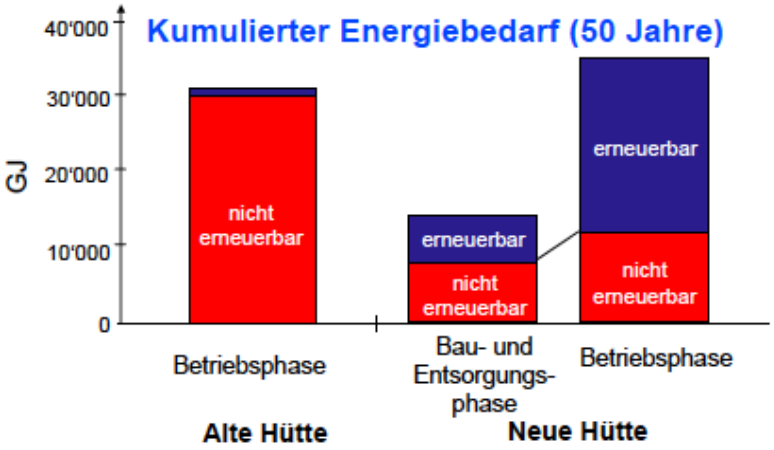

Abbildung 4 *50 Jahre Energiebedarf in GJ Monte Rosa Hütte*

4.2 Mindelheimer Hütte (2.058 m)

Auf der anderen Talseite nordwestlich der Rappensee-Hütte liegt die Mindelheimer Hütte. Sie wurde 1920 erbaut und mehrmals neu- und umgebaut. Sie ist in 2 Stunden vom österreichischen Lechtal und in 3,5 Stunden von Oberstorf erreichbar.

Die Unterkunft wurde im Jahr 2004 als Leitprojekt für „Ökologische Umgestaltung von Berg- und Schutzhütten“ durch das Kompetenzzentrum Umwelt Augsburg-Schwaben ausgezeichnet. Die Umbaumaßnahmen wurden gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Die Mindelheimer Hütte (2.058 m) ist eine Berghütte der DAV Sektion Mindelheim. Die Schutzhütte ist mit ihren 200 Plätzen etwa um ein Drittel kleiner als die Rappensee-Hütte und hatte im Durchschnitt der letzten 5 Jahre 8700 Gäste pro Saison. Die Tagesgäste sind hier nicht berücksichtigt. (G.R. Träumer, 2007) Auch hier sollen nur die elektrische Energie und weder die Bereiche Wasser noch Wärme betrachtet werden.

Elektrische Energie

PV-Module: 5,4 kW_p 108 Module je 50 W_p

Batterie: 48,6 kWh

BHKW: 28 kW_{el} (Rapsöl)

BHKW: 52 kW_{th} (Rapsöl)

5. Projekt Rappensee-Hütte (2.091 m)

5.1 Darstellung

Die Rappenseehütte (2.091 m) des Deutschen Alpenvereins Sektion Allgäu-Kempten ist erreichbar mit Bus und Bahn von Oberstdorf oder mit dem PKW. Von Birgsau Anstieg zu Fuß in 3,5 Stunden. Seit ihrer Errichtung im Jahr 1885 ist sie viermal erweitert worden zuletzt im Jahr 2000. Die Schutzhütte liegt direkt am Heilbronner Weg. Das ist eine beliebte mehrtägige Bergtour über einen Teil des Hauptkamms der Allgäuer Alpen im Grenzgebiet von Deutschland und Österreich. Sie dient den Bergsteigern mit einer Kapazität von

über 300 Plätzen als Stützpunkt und ist von Juni bis Oktober bewirtschaftet. Während dieser 4 Monate beherbergt sie durchschnittlich 12.000 Gäste. (DAV S. A.-K., 2010)



Abbildung 5 Rappenseehütte von Osten

Das Haus liegt exponiert auf einer Hochebene und ist eingerahmt von den folgenden Gipfeln: OSO: Rotgundspitze 2485 m, SO: Hochgundspitze 2460 m, S: Rappenseekopf 2468 m, SSO: Hochrappenkopf 2424 m, SO: Rappenköpfle 2276 m

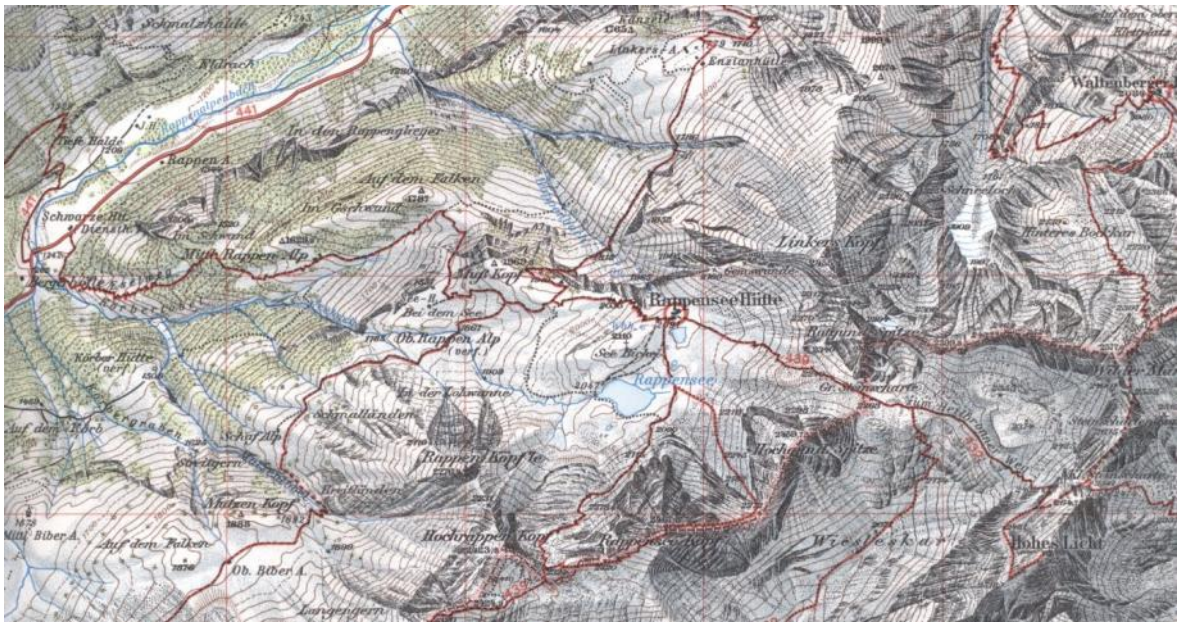

Abbildung 6 Ausschnitt AV Karte Allgäuer/Lechtaler Alpen West

5.2 Energieversorgung heute

Die Beurteilung und Auslegung des Energie/Stromkonzepts wurde anhand der Richtlinien des Planungsleitfadens für Energiekonzepte von Berghütten des Fraunhofer ISE (Fraunhofer ISE, 2002) durchgeführt.

Die Stromversorgung wird derzeit über 3 Wege sichergestellt:

- Kleinwasserkraftwerk,

das aus dem anliegenden Rappensee durch Schmelz- und Niederschlagswasser gespeist wird. Die eingebaute PELTON-Turbine erreicht bei einer Fallhöhe von 40 m und einer Schüttung von 30 l/s eine Nennleistung von 11 kW.

Die Schüttung erfolgt permanent und kann nur manuell abgesperrt werden (z.B. bei Wassermangel im Spätsommer). Da kein Stromspeicher vorhanden ist, wird die überschüssige Energie in der Nacht und auch bei Betrieb des BHKW ungenutzt abgeleitet. Ein Zähler ist nicht vorhanden, so dass die Deckung durch grobe Abschätzungen erfolgen muss. Anhand der erstellten Strombilanzrechnung konnte eine mittlere Leistung von 8 kW als plausibel angenommen werden.

- Diesel-BHKW IVECO

mit den folgenden Leistungdaten:

Gesamtleistung:	95,5 kW
el. Leistung:	31,6 kW (η_{el} 33,1 %)
therm. Leistung:	36,3 kW (η_{therm} 38,0 %)
Gesamtwirkungsgrad:	71,1 %.

Aus der Literatur sind Schätzungen bekannt, dass der Wirkungsgrad eines BHKW mit 1000 Höhenmetern jeweils um 10 % absinkt, so dass man für den vorliegenden Fall von einer Nennleistung von 25 kW el. und 30 kW therm. ausgehen kann.

Der jährliche Dieselverbrauch liegt bei 6000 l, der in 50 l-Behältern mit der Materialseilbahn (max. Zuladung 250 kg) zur Hütte gebracht wird. Auf Grund der fehlenden Speicher wird das BHKW je nach Belegungsgrad der Hütte einen Großteil der Betriebszeit unter Teillast von 50-70 % betrieben, was sich auf den Verstromungswirkungsgrad negativ auswirkt. Bei voller Belegung kommt das BHKW während der Haupt-Kochzeiten an seine Kapazitätsgrenze.

Die Nutzung der Abwärme kann nach Aussagen der verantwortlichen Fachleute vor Ort durch eine ungenügende Einbindung nicht in dem oben genannten Umfang genutzt werden; Schätzungen gehen von ca. 9 kW durch BHKW-integrierte Motor- und Abgas--Kühlung und 2-4 kW durch einen zusätzlich installierten Abgaswärmetauscher aus.

- Notstromaggregat

als Dieselgenerator mit 9 kW, der allerdings nur bei Ausfall des BHKW bzw. in außergewöhnlichen Lastsituationen einspringt.

Elektrische Energie

PV-Module: keine

Batterie: keine

Kleinwasserkraft: 8 kW_{el}

BHKW: 25 kW_{el} (Diesel) Abwärme wird nicht optimal genutzt

BHKW: 9 kW_{el} (Diesel-Notstromaggregat)

5.3 Energiebedarf heute

Es sind keine Zähler in der Hütte installiert, wodurch eine Abschätzung des Stromverbrauchs über die Nennleistung der Geräte und deren durchschnittliche Laufzeit erfolgen muss. Durch Diskussionen mit den Hüttenverantwortlichen (Hüttenwart, Hüttenwirt, Elektriker, Installateur) konnte näherungsweise ein Abbild des Tageslastganges, auch in Abhängigkeit von der Hüttenbelegung, erstellt werden. Zur Vereinfachung wurde das Lastverhalten anhand von 2 Szenarien der Verbrauchssituation, Volllast (±250 Gäste) und Teillast (80-100 Gäste; entspricht ca. dem Durchschnittsverbrauch) modelliert.

Dabei wurden die Verbraucher in 4 Gruppen gemäß Tabelle 1 unterteilt:

Verbraucher	**Nennleistung kW**
Infrastruktur	
Kühl-/Gefrieranlagen	1,50
Funk	0,05
Ladegerät Handyumsetzer	1,00
Druckerhöher	3,00
UV-Wasserbehandlung	0,08
Lüftung Trockenraum	0,50
Wärmekopplung BHKW	0,30

Bahn	8,00
Licht Gastraum	0,50
Licht Gebäude 50*9 W	0,45
Notbeleuchtung 24 h 30*9W	0,27
Küche*	
Dämpfer	3,00
Kaffemaschine	2,00
Lüftung	4,00
Kleingeräte Küche	0,50
Geschirrspüler	5,00
Gläserspülmaschine	5,00
Milchschäumer	1,00
Mikrowelle	3,00
Mikrowelle	1,00
Waschen	
Waschmaschine groß	5,00
Waschmaschine klein	4,00
Trockner	2,00
Privat	0,50
Summe	51,65

* ein Großteil der Kochgeräte wird auf Grund der Stromknappheit mit Flüssiggas bzw. im Kombibetrieb Gas-Strom betrieben

Tabelle 1: Übersicht Stromverbraucher

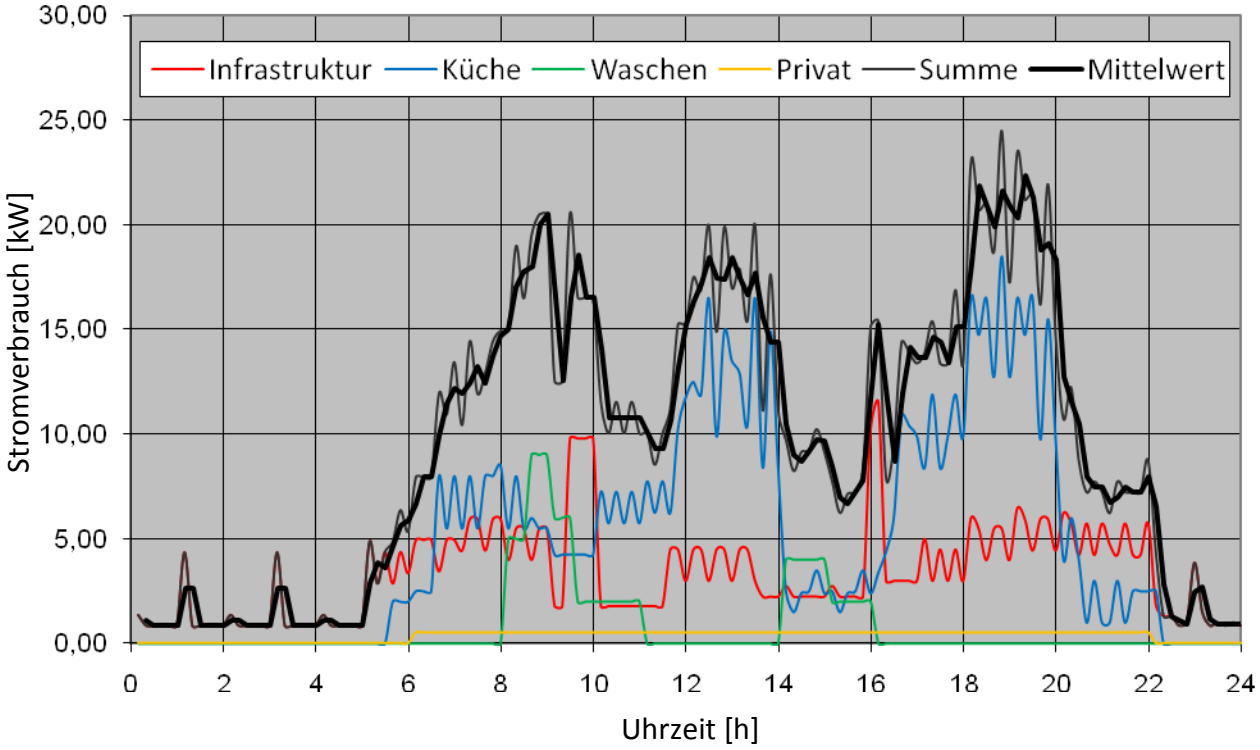

Abbildung 7 *Lastgang der Stromversorgung bei Volllast (±250 Gäste)*

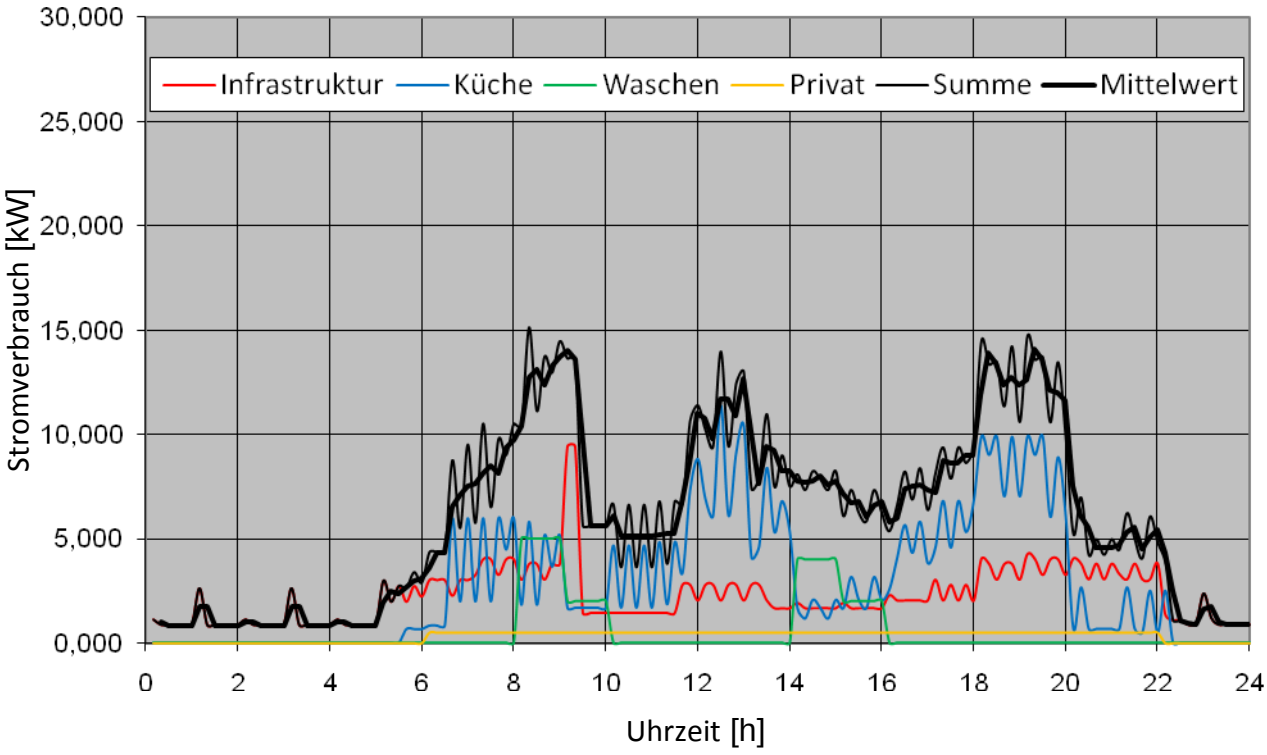

Abbildung 8 *Lastgang der Stromversorgung bei Teillast/Durchschnitt (80-100 Gäste)*

Unter der Annahme von 120 Bewirtschaftungstagen wurde in der folgenden Tabelle für die 2 berechneten Szenarien der Tagesbedarf sowie dessen Deckung aus Wasserkraft (Bedarf < 8 kW) und BHKW (Bedarf > 8 kW) dargestellt.

Tagesbetrachtung	Einheit	Volllast	Teillast			
Gäste		250	80			
Stromverbrauch	kWh	230,00	145,00			
Wasserkraft	kWh	34,00	59,00			
BHKW	kWh	196,00	86,00			
Laufzeit	h	14	8,67			
mittlere Leistung	kW	14	10			
mittlerer elektr. Wirkungsgrad	%	22,90	18,90			
Saisonbetrachtung				Summe	Durchschnitt	%
Tage		15	105	120		
Gäste		3750	8400	12150	101	
Stromverbrauch	kWh	3450	15225	18675	156	
Wasserkraft	kWh	510	6195	6705	56	36%
BHKW	kWh	2940	9030	11970	100	64%
Dieselverbrauch	l	1284	4778	6062	51	

Tabelle 2: Deckung des Tagesbedarfs aus Wasserkraft und BHKW

Der Jahresbrennstoffverbrauch von 6000 l Diesel (= 60000 kWh) und der, aus den ermittelten Lastprofilen errechneten Primärenergiebedarf des BHKW in vergleichbaren Größenordnung liegen, kann daraus auf die Plausibilität der Energieverbrauchsszenarien geschlossen werden.

6. Auslegung der Photovoltaikanlage im Gesamtsystem

Die Auslegung der Photovoltaikanlage einschließlich der Einflüsse aller Randbedingungen wurde mit dem Simulationsprogramm PVSYST Version 5.10 (Universität Genf, 2010) durchgeführt.

6.1 Verschattungsanalyse

Zur Beurteilung der Verschattungssituation wurde mit Hilfe des Programms GOOGLE EARTH (GOOGLE EARTH, 2010) das Horizontprofil um die Rappenseehütte ermittelt.

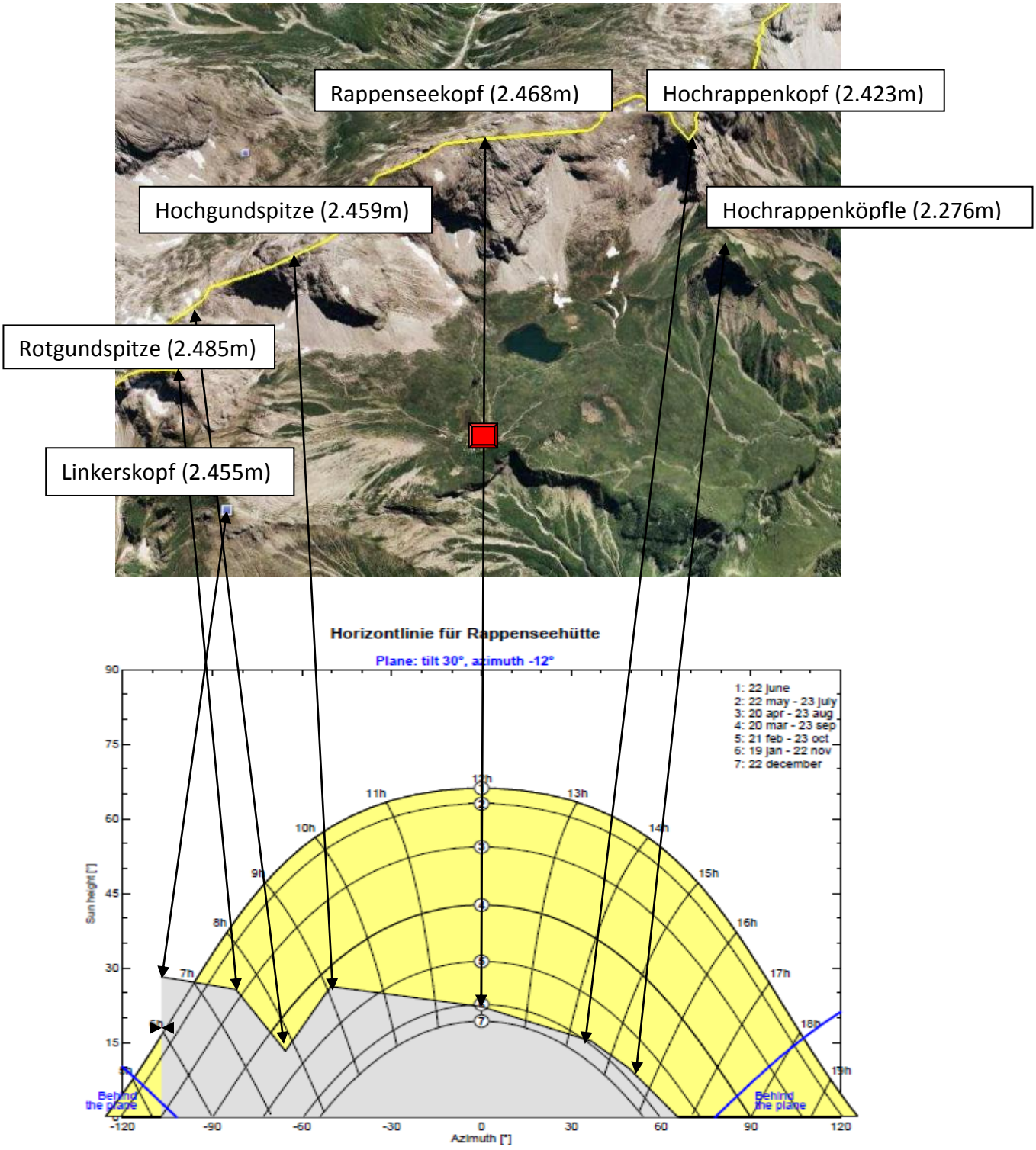

Abbildung 9 Satellitenbild des umgebenden Bergpanoramas (Standort Rappenseehütte) und die Projektion auf das Sonnenstanddiagramm

Es zeigt sich, dass eine Verschattung durch die umliegenden Berge nur am frühen Morgen stattfindet, wobei sich die Situation im zunehmenden Jahreslauf durch die niedrigere Sonnenbahn verschlechtert. Aus der Abschätzung ergibt sich, dass im bewirtschafteten Zeitraum bis Mitte Oktober spätestens ab 9 Uhr mit einer unverschatteten Einstrahlung gerechnet werden kann.

Für den Aufbau der Photovoltaikanlage stehen das, in einem Azimut-Winkel von -12° stehende Dach auf dem Haupthaus mit 35° Neigung, sowie die Dachfläche des Nebengebäudes, das bei gleicher Ausrichtung eine Neigung von 30° aufweist, zur Verfügung.



Abbildung 10 Hauptgebäude mit dahinterliegendem Nebengebäude

Das Dach des Hauptgebäudes weist durch ein Querhaus mit gleicher Firsthöhe sowie diversen Gauben und Schornsteinen eine stark unterbrochene, und auch verschattungstechnisch problematische Fläche auf. Simulationen zeigen, dass sowohl in den Morgen- als auch in den Nachmittagsstunden Nahverschattungen auftreten. Zusammen mit der ebenfalls reduzierten nutzbaren Fläche wird deshalb das Hauptgebäude nicht als Photovoltaikfläche in Betracht gezogen.

Die Dachfläche des Nebengebäudes stellt sich in diesem Sinne homogener dar, muss aber bezüglich der Verschattung durch das nahe liegende Haupthaus untersucht werden.

Die bauliche Situation wurde anhand der Lage- und Konstruktionspläne in PVSYST modelliert und berechnet.

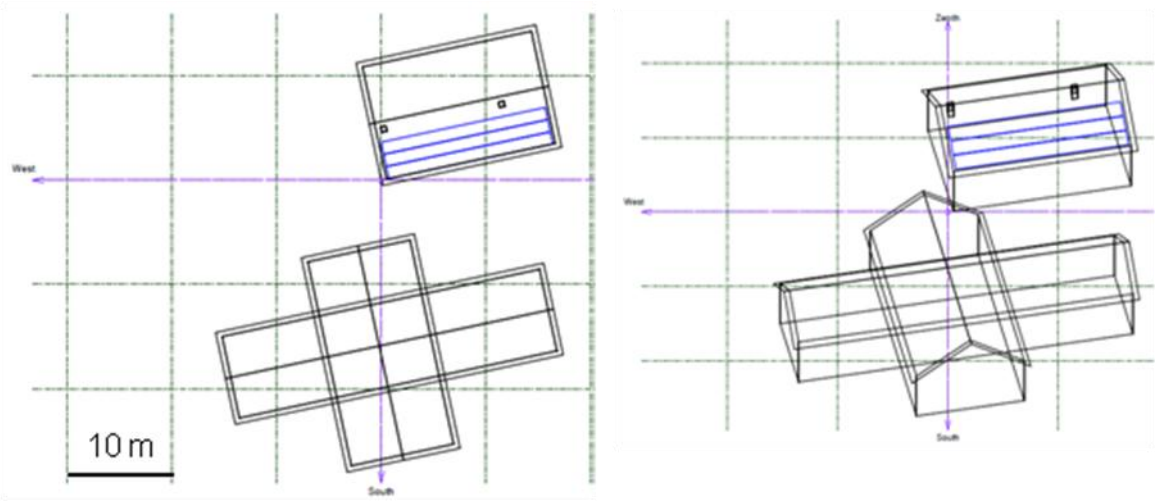

Abbildung 11 Draufsicht und perspektivische Seitanansicht

Aus den durchgeführten Simulationen ergibt sich relevanten Nutzungszeitraum von Ende Mai bis Mitte Oktober keinerlei Nahverschattung durch den Giebel des Hauptgebäudes.

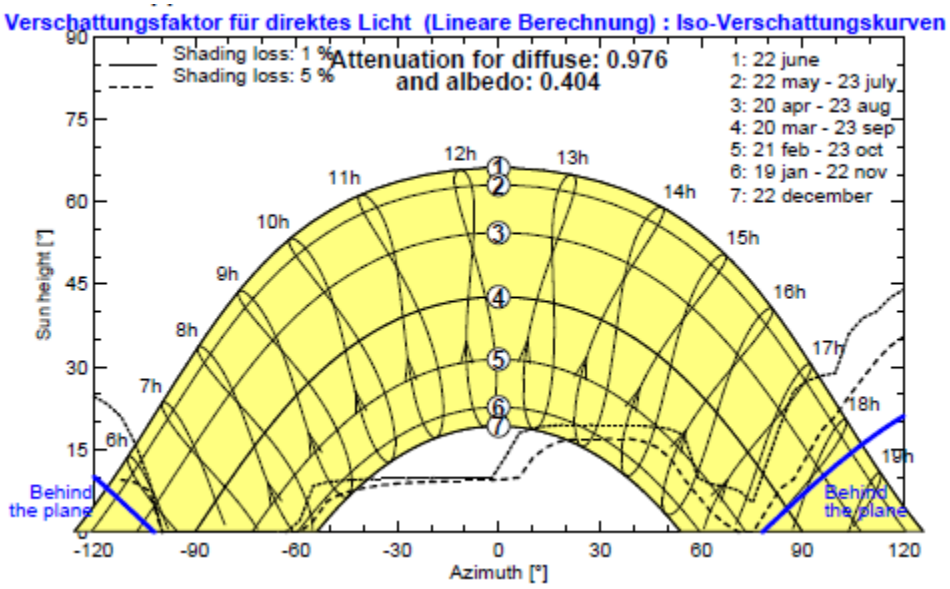

Abbildung 12 Einfluss von Nahverschattungen

Die verfügbare Dachfläche beträgt unter Berücksichtigung der Sicherheitsabstände zu Kaminen und Dachrändern max. 72 m² (ca. 4,5*16 m).

Die folgende Tabelle zeigt die aus der PVSYST-Simulation errechneten Daten bezüglich Ausbeute und Verluste:

Monat	Juni	Juli	August	September	Summe
Globalstrahlung kWh/m²	154	162	150	121	587
Faktor Horizontverschattung	0,877	0,886	0,881	0,883	
Faktor Nahverschattung	0,996	0,996	0,996	0,996	
Faktor Reflektion	0,973	0,975	0,975	0,975	
Globalstrahlung eff kWh/m²	131	139	128	103	501
Globalstrahlung kWh/58 m²	7598	8062	7424	5974	29058
Nominelle PV-Energie η=16,2 %	1238	1314	1210	974	4736
Verluste Strahlungsstärke kWh	69	68	64	54	255
Modulqualitätsverluste kWh	21	22	20	17	80
Mismatchverluste kWh	21	22	20	17	80
Ohmsche Verluste kWh	10	11	10	8	39
Verschmutzungsverluste kWh	12	13	12	10	47
Temperaturverluste kWh	62	66	61	29	217
PV-Energie im MPP kWh	1044	1112	1024	839	4018
MPP Verluste kWh	27	25	24	29	105
PV-Energie am Ausgang kWh	1017	1087	1000	810	3913

Tabelle 3: Übersicht über PV-Ausbeute und -Verluste

6.2 Schneelast

Da die Module in 2.000 m Höhe anderen Bedingungen wie in normal besiedelten Gebieten Deutschland ausgesetzt sind, müssen die Anforderungen entsprechend höher sein.

Nach Auskunft der Hüttenverantwortlichen liegt eine besonders hohe Schneebelastung der Dachflächen vor, und es sollten nur Module verwendet werden, die den vorhandenen Zug- und Druckbelastungen standhalten. Bei der Auswahl der Module sollte demnach auf einer Zertifizierung nach IEC 61646 geachtet werden. Im Testzyklus 10.16 des TÜV Rheinland werden die Module mit 2.400 Pa (entspricht 2.400 N/m^2) eine Stunde lang belastet. (Rheinland, 2010) Da die Module selbst wegen der Unterlüftung nicht direkt auf die Dachfläche montiert werden dürfen, ist mit einem entsprechenden Unterbau konstruktiv auf eine gute Flächenverteilung der Druckbelastung zu achten. Ein solides Befestigungssystem auf dem Dach und die Art der Montage sind von entscheidender Bedeutung.

Um die maximal zu erwartende Schneelast abschätzen zu können und um auf der sicheren Seite zu sein, wird sie nicht nach der deutschen Schneelastzonenkarte DIN 1055-5, sondern nach der von Österreich berechnet. Das Gebiet von Österreich wurde in vier Lastzonen unterteilt. Die „Allgäuer Alpen“ befinden sich im direkten Grenzbereich zu Österreich in der Schneelastzone 4.

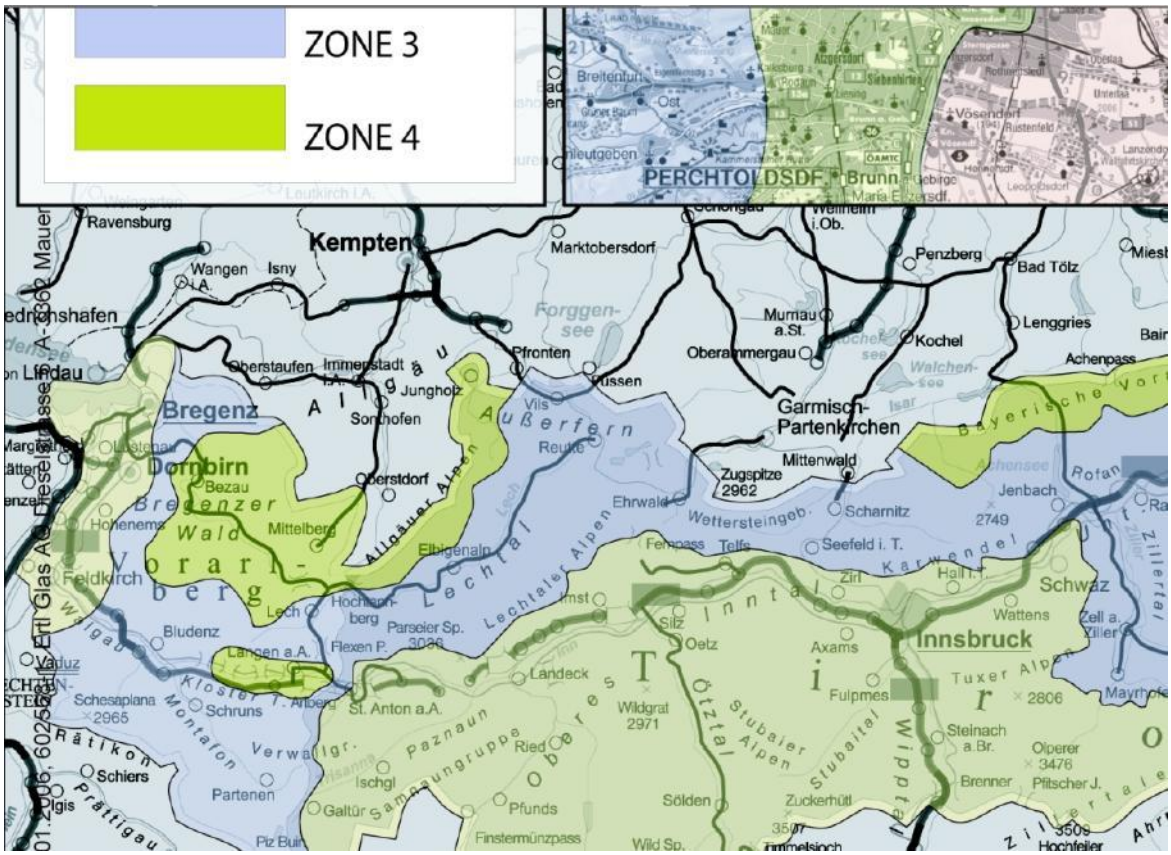

Abbildung 13 Schneelastzonen Österreich (Kartenausschnitt)

Die in der Karte dargestellte Zoneneinteilung zeigt langjährig ermittelte meteorologische Daten (Normungsinstitut, 2005). Die Schneelast für das Gebiet um die Rappensee-Hütte wird nach OENORM-B-201991-1-3 mit folgender Formel berechnet:

$$s_k = (0{,}642 \cdot Z + 0{,}009) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{728}\right)^2\right]$$

s_k charakteristische Schneelast auf dem Boden [kN/m^2]
A Geländehöhe über dem Meeresspiegel (Seehöhe)
Z Rechenwert für die Zonen-Nummer gemäß Tabelle B.1

Tabelle B.1

Zonen-Nummer		s_k für A = 0
Nummer in der Karte	Rechenwert für Gleichung (1)	
		kN/m²
2	2	1,3
2*	1,6	1,0
3	3	1,9
4	4,5	2,9

Tabelle 4: Rechenwerte für Schneelast nach OENORM

$$s_k = (0{,}642 \cdot 4{,}5 + 0{,}009) \cdot \left[1 + \left(\frac{2091}{728}\right)^2\right]$$

Es ergibt sich für unseren Standort ein Wert von 26,8 kN/m^2 auf die Ebene bezogen. Mit dem Formbeiwert für eine Dachneigung von 30° von $\mu_i = 0{,}8$ ergibt sich auf das schräge Dach bezogen ein Wert von

$$s_i = \mu_i \cdot s_k$$

$$s_i = 0{,}8 \cdot 26{,}8 \frac{kN}{m^2}$$

$$s_i = 21{,}44 \frac{kN}{m^2}$$

Bei einer mittleren Schneedichte von 500 kg/m^3 (Lawinenwarnzentrale, 2006) bedeutet das eine Höhe von etwa 4 Meter stark durchnässtem Altschnee pro Quadratmeter auf der geneigten Dachfläche und damit auf den Modulen. Rahmenlose Module halten aber nicht einer Druckbelastung von 21,4 kN/m^2, sondern nur einer Schneelast von 2,4 kN/m^2 stand (Rheinland, 2010) was einer Schneehöhe von 50 cm entspricht. Durch verstärkte Rahmenbauweise kann nach Herstellerangaben (Kyocera, 2010) einer Druckbelastung von 5,4 kN/m^2 standgehalten werden. Das entspricht aber auch nur etwa einem Viertel der maximal aufzunehmenden Last.

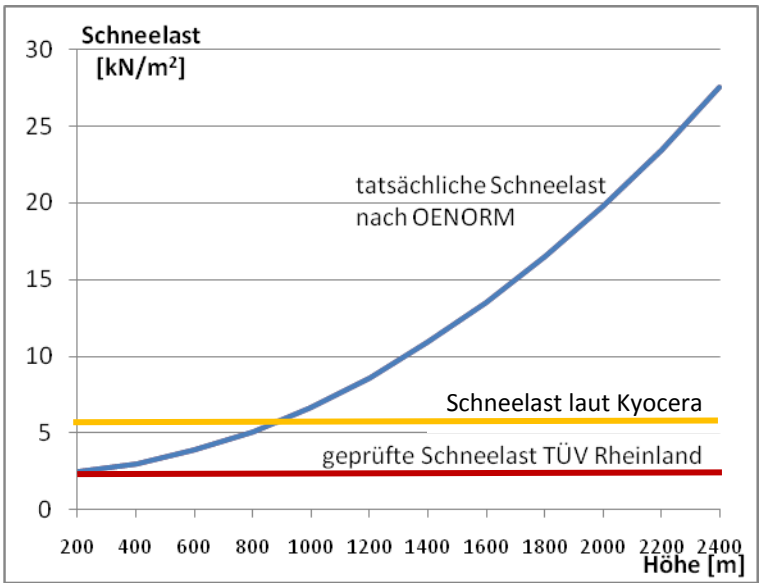

Abbildung 14 Schneelast über Meereshöhe

Damit einem zu starkes Durchbiegen oder gar Abknicken bei rahmenlosen Modulen vorgebeugt wird, muss eine tragfähige Unterkonstruktion mit vielen Stegen zur Unterstützung gewählt werden.



Abbildung 15 Abgeknickte Module nach Schneelast (DGS, 2006)



Abbildung 16 Etwas besser montierte Module Starkenburger Hütte (Landau, 2008)

6.3 Elektrische Ausrüstung Hybridsystem

Die zu installierenden Blei-Gel Akkus sollen möglichst oft durch das vorhandene Kleinwasserkraftwerk und durch den Solargenerator geladen und damit Diesel eingespart werden. Für die PV-Anlage steht eine Dachfläche auf dem Nebenhaus von: 17,8 m x 4,5 m zur Verfügung. Hier sollen polykristalline Module mit den Maßen 990 mm x 1.500 mm und einer Leistung von je 210 W_p installiert werden.

Nach einer Marktrecherche entschied man sich für das Modell Kyocera KD 210 PH 2PU. Die einzelnen Module werden in 3 Strängen zu je 13 Modulen in Reihe geschaltet. Am Ende erhält jeder Strang seinen eigenen Wechselrichter. Es sollen hier 3 SMA Sunny Boy 3000 installiert werden (siehe Tabelle 5). Fällt nun ein Strang aus wirkt sich das nicht auf den gesamten Solargenerator aus. Leistungsverluste werden damit reduziert und es besteht ein Maximum an Versorgungssicherheit.

Technische Daten	
	Sunny Boy 3000 HF
Eingang (DC)	
Max. DC-Leistung (@ cos f=1)	3150 W
Max. DC-Spannung	700 V
MPP-Spannungsbereich	210 V – 560 V
DC-Nennspannung	530 V
Min. DC-Spannung / Startspannung	175 V / 220 V

Max. Eingangsstrom / pro String	15 A / 15 A
Anzahl MPP-Tracker / Strings pro MPP-Tracker	1 / 2 '
Ausgang (AC)	
AC-Nennleistung (@ 230 V, 50 Hz)	3000 W
Max. AC-Scheinleistung	3000 VA
AC-Nennspannung; Bereich	220, 230, 240 V; 180 – 280 V
AC-Netzfrequenz; Bereich	50, 60 Hz; ± 4,5 Hz
Max. Ausgangsstrom	16 A
Leistungsfaktor (cos f)	1
Einspeisephasen / Anschlussphasen	1 / 1 '
Wirkungsgrad	
Max. Wirkungsgrad / Euro-eta	96,3 % / 95,5 %
Schutzeinrichtungen	
DC-Verpolungsschutz	ja
DC-Lasttrennschalter ESS	ja
AC-Kurzschlussfestigkeit	ja
Erdschlussüberwachung	ja
Netzüberwachung (SMA Grid Guard)	ja
Galvanisch getrennt / Allstromsensitive Fehler-stromüberwachungseinheit	ja / —
Schutzklasse / Überspannungskategorie	I / III
Allgemeine Daten	
Maße (B / H / T) in mm	348 / 580 / 145
Gewicht	17 kg
Betriebstemperaturbereich	–25 °C … +60 °C
Geräuschemission, typisch	www.SMA-Solar.com
Eigenverbrauch (Nacht)	0,8 W
Topologie	HF-Transformator
Kühlkonzept	OptiCool
Schutzart Elektronik / Anschlussbereich (nach IEC 60529)	IP65 / IP54
Klimaklasse (nach IEC 60721-3-4)	4K4H
Ausstattung	
DC-Anschluss: SUNCLIX	ja
AC-Anschluss: Schraubklemme / Steckverbinder / Federzugklemme	— / ja / —

Display: Textzeile / Grafik	— / ja
Schnittstellen: RS485 / Bluetooth	opt. / ja
Garantie: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 Jahre	ja / opt. / opt. / opt. / opt.
Zertifikate und Zulassungen (weitere auf Anfrage)	CE, VDE 0126-1-1, DK 5940, RD 1663, G83/1-1, PPC, AS4777, EN 50438**, C10/C11, PPDS
Stand März 2010 – Angaben bei Nennbedingungen	
Typenbezeichnung	SB 3000HF-30

Tabelle 5: Technische Daten Strangwechselrichter SB 3000 HF

Jeder der drei SB 3000 versorgt dabei eine Phase des 3-phasigen Netzes. Der PV-Generator wird mit seinen 39 Modulen eine Nennleistung von 8,19 kWp haben. Der Generator wird an ein System aus 3 Sunny Island 5048 angeschlossen. Damit kann ein komplett autarkes AC-gekoppeltes Netz aus PV, Kleinwasserkraft und BHKW verwaltet werden. Es können bidirektional Stromerzeuger und Stromverbraucher angeschlossen werden. So kann so das Netz der Rappensee-Hütte mit AC-Nennlasten bis 25 kW versorgt werden.

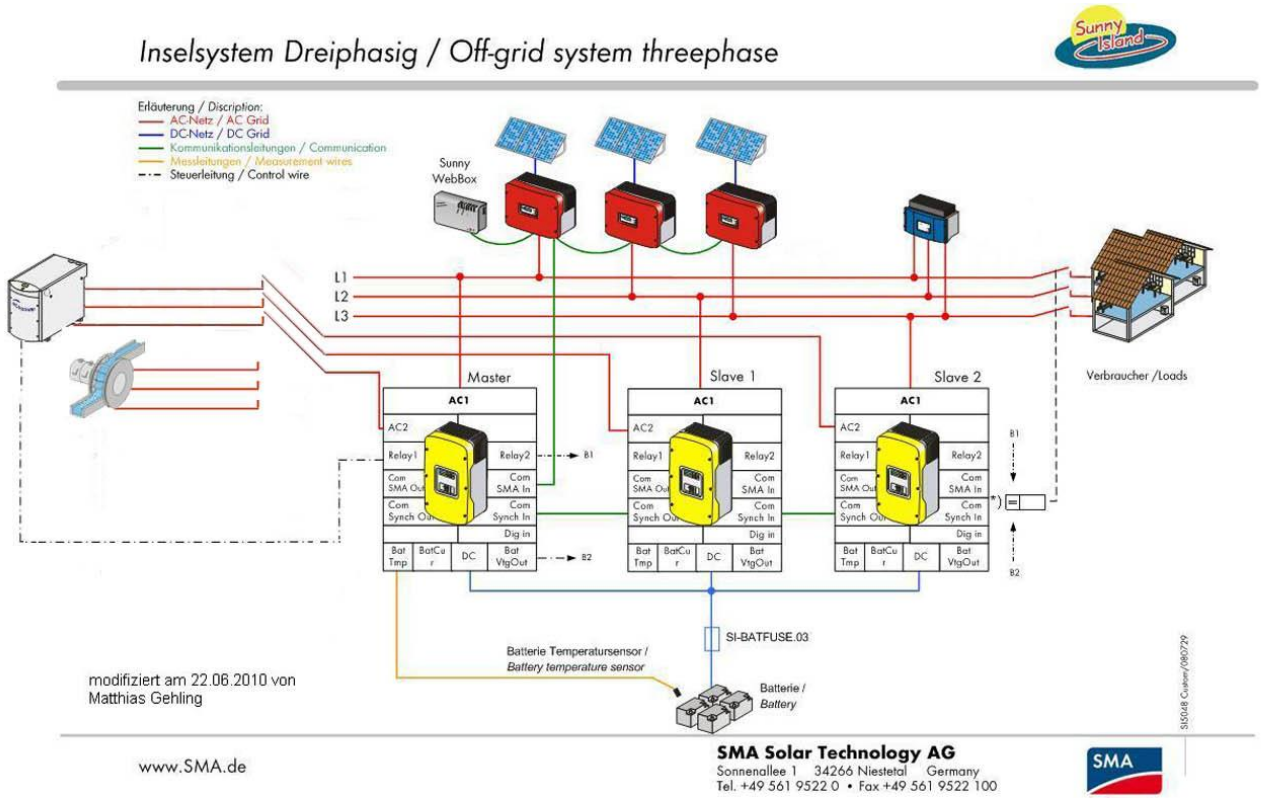

Abbildung 17 Inselsystem 3-phasig, Rappenseehütte (SMA Solar Technology AG, Michael Ebel, 2010)

Das netzbildende Diesel-BHKW (Iveco) und der Kleinwasserkraft-Generator werden auf dem separaten Wechselstromeingang (AC2) installiert. Zwischen Wasserkraft und BHKW kann manuell umgeschaltet werden.

Bei der Wasserkraftanlage wird die kinetische Energie der Turbine durch den Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die Netzfrequenz (in Europa 50 Hz) bestimmt die Drehzahl des Generators. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Synchrongeneratoren und Asynchrongeneratoren.

Im Inselbetrieb werden üblicherweise Synchrongeneratoren verwendet. Im Zentrum des Synchrongenerators befindet sich ein Magnet der mit konstanter Geschwindigkeit synchron (also phasengleich) mit dem rotierenden elektromagnetischen Magnetfeld läuft. (Moré, HAW Solar e.V., 2010) (Koeppen, 2010) Sie laufen bei allen Lastzuständen stets mit synchroner Drehzahl. Da Asynchrongeneratoren ihre Erregerfrequenz aus dem öffentlichen Netz beziehen werden sie meist im Netzparallelbetrieb verwendet. Im Inselbetrieb müsste die Erregung mittels einer Kondensatorbatterie und spezieller Regler und Umrichter sichergestellt werden. (Indinger, 2008)

	Synchrongenerator	**Asynchrongenerator**
Läufererregung notwendig	Ja	Nein
Eigenständiges Anlaufen aus dem Stillstand	Nein	Ja
Spannungsregelung möglich	Ja	Nein
Wirkleistungsregelung möglich	Ja	Ja
Blindleistungsregelung möglich	Ja	Nein
Einspeisung ins öffentliche Netz	Ja	Ja
Inselbetrieb möglich	Ja	Nur in bestimmten Fällen
Synchronisierung notwendig bei Netzverbindung	Ja	Nein
Wirkungsgrad	Höher	Niedriger
Investkosten/Betriebskosten	Höher/ Höher	Niedriger/ Niedriger
Konstruktion	Aufwendiger	Einfacher
Platzbedarf	Größer	Kleiner

Tabelle 6: Grundsätzliche Unterschiede zwischen Synchron- und Asynchrongenerator

Da das zu aufwendig ist treibt, wie im Inselbetrieb üblich auch auf der Rappenseehütte die Peltonturbine einen Synchrongenerator an, der die elektrische Energie in das AC-Netz einspeist. (Hubert Deubler Elektromechanik Meisl GmbH, 2010)

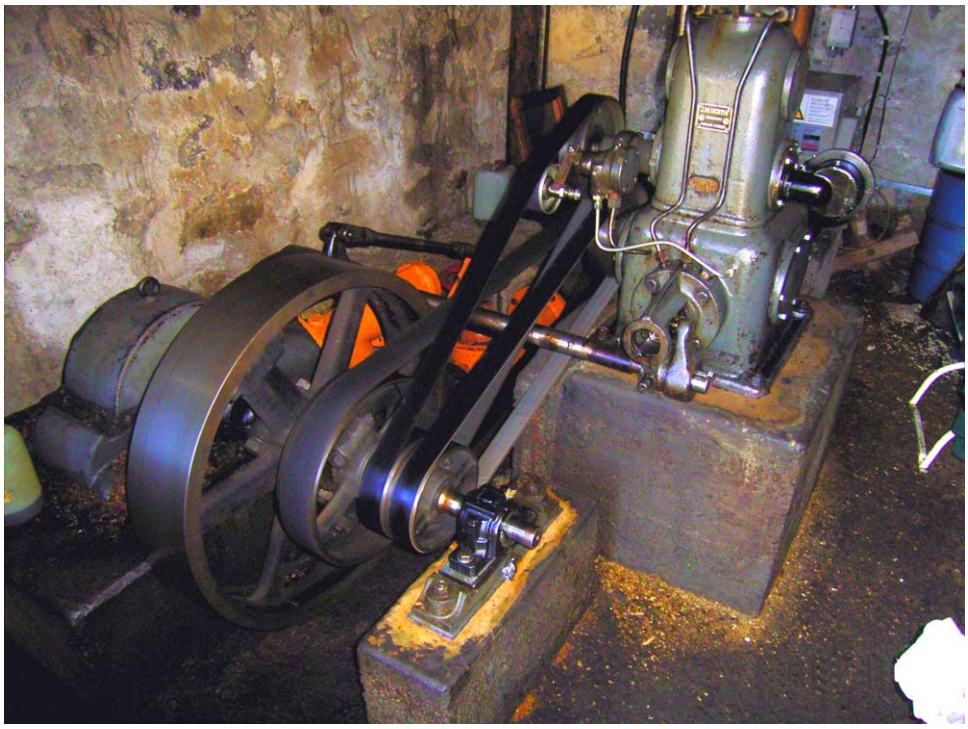

Abbildung 18: Pelton-Turbine mit Schwungrad (Elektro-Mechanik Meisl GmbH, 2007)



Abbildung 19: Turbine mit Synchron-Generator vorne rechts, hinten Druckfallrohr mit rotem Absperrschieber (Elektro-Mechanik Meisl GmbH, 2007)

In den frühen Sommermonaten werden die Blei-Gel-Akkus und die Verbraucher ohne Unterbrechung mit Wasserkraft versorgt. Sollte die Energie bei Lastspitzen oder bei Wassermangel im Spätsommer nicht ausreichen wird das BHKW zugeschaltet (siehe Abbildung 17).

Die Energie wird in einem Batterieverbund aus 24 baugleichen OPzV 2 Volt-Blei-Gel-Zellen mit einer Kapazität von 2000 Ah gespeichert. Vorgeschlagen wird das Modell A602 der Firma Sonnenschein. Es ergibt sich eine Nennspannung von 48V mit der eine stabile AC-Energieversorgung gewährleistet werden kann.

Um Schwankungen im Netz zum Beispiel durch das Kleinwasserkraftwerk auszugleichen wird ein Laderegler Smart Load 600 eingebunden. Der Regler stellt eine elektronische Last dar. Über die Netzfrequenz erkennt er ob ein Überschuss an Energie vorliegt. In diesem Fall regelt er durch Abgabe von Wärme (Umwandlung elektr. Energie in Wärmeenergie) die überschüssige Energie ab. Die Wärme wird nicht genutzt sondern wird an die Umgebung abgegeben.

6.4 Intelligentes Inselmanagement

Mit den drei modular aufgebauten Batteriestromrichtern wird ein komplexes dreiphasiges Hybridsystem geregelt. Anstatt der auf der Rappensee-Hütte eingesetzten Wasserkraft kann je nach örtlichen Gegebenheiten auch eine Kleinwindkraftanlage verwendet werden.

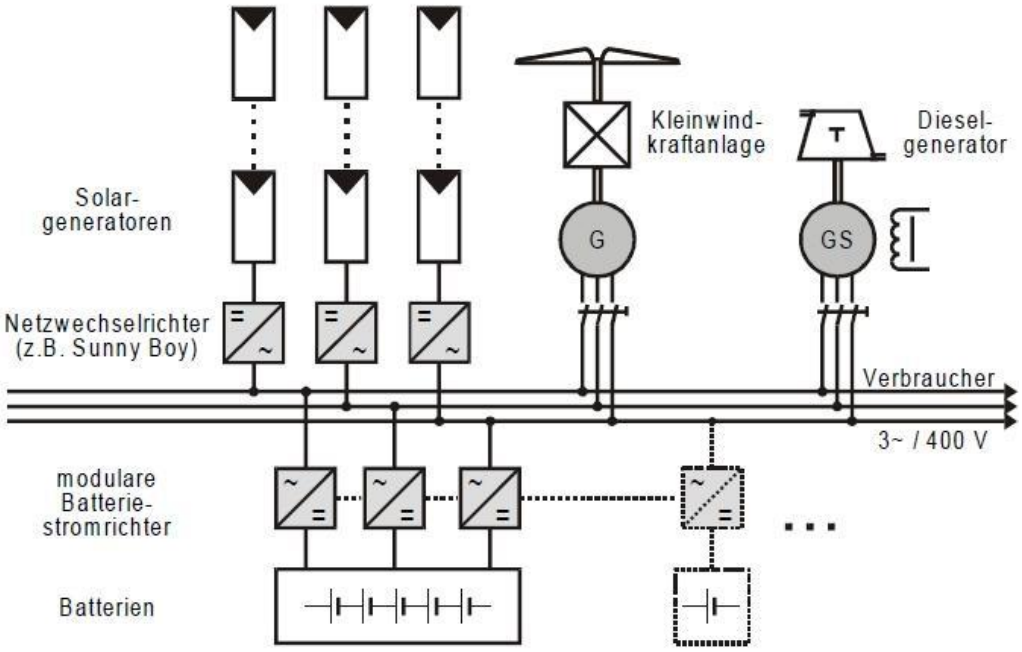

Abbildung 20 Beispiel für den Aufbau eines 3-phasigen modularen Inselnetzes (Kassler Symposium Energie-Systemtechnik, Bruno Burger, 1999)

Die drei Sunny Island Batteriewechselrichter 5048 haben Steuer- und Regelungsaufgaben. Hauptaufgabe ist es, die Akkus zu laden und die anliegende Last zu überwachen. (Abbildung 18) Es findet also ein kontrolliertes und aktives Lade- und Lastmanagement der Zellen und der Verbraucher statt. Weiterhin wird die Regelung von Spannung und Strom im laufenden Betrieb übernommen. Der Parallelbetrieb von mehreren Stromerzeugern wird ermöglicht.

Technische Daten	
AC-Ausgang (Verbraucher)	**Sunny Island 5048**
AC-Nennspannung (einstellbar)	230 V (202 V – 253 V)
Nennfrequenz (einstellbar)	50 Hz / 60 Hz (45 Hz – 65 Hz)
AC-Dauerleistung bei 25°C / 45°C	5000 W / 4000 W
AC-Leistung bei 25°C für 30 min / 1 min / 5 s	6500 W / 8400 W / 12000 W
AC-Nennstrom / Max. AC-Strom (peak)	21,7 A / 120 A für 60 ms
Klirrfaktor Ausgangsspannung / Phasenverschiebung (cos ϕ)	< 3% / –1 bis +1
AC-Eingang (Generator oder Netz)	
Eingangsspannung (Bereich)	230 V (172,5 V – 264,5 V)
Eingangsfrequenz (Bereich)	50 Hz / 60 Hz (40 Hz – 70 Hz)
Max. Eingangsstrom (einstellbar) / Max. Eingangsleistung	56 A (0 A - 56 A) / 12,8 kW
DC-Eingang Batterie	
Batteriespannung (Bereich)	48 V (41 V – 63 V)
Max. Batterieladestrom / Dauerladestrom bei 25 °C	120 A / 100 A
Batterietyp / Batteriekapazität (Bereich)	Blei, NiCd / 100 – 10.000 Ah
Laderegelung	IUoU-Verfahren
Wirkungsgrad / Eigenverbrauch	
max. Wirkungsgrad	95%
Eigenverbrauch ohne Last / Standby	25 W / 4 W
Schutzeinrichtungen	
DC-Verpolungsschutz / DC-Sicherung	ja / ja
AC-Kurzschluss / AC-Überlast	ja / ja
Übertemperatur / Batterietiefentladung	ja / ja
Allgemeine Daten	
Maße (Breite / Höhe / Tiefe in mm)	467 / 612 / 235

Gewicht	63 kg
Betriebstemperaturbereich	–25 °C ... +50 °C
Schutzart	Innenmontage (IP30)
Ausstattung / Funktion	
Bedienung & Display / Multifunktions-Relais	Intern / 2
3 phasige Systeme / Parallelschaltung	ja / ja
integrierter Bypass / Multiclusterbetrieb	- / ja
Ladezustandsberechnung / Voll- / Ausgleichsladung	ja / ja / ja
integrierter Sanftanlauf / Generatorsupport	ja / ja
Batterietemperatursensor / Kommunikationsleitungen	ja / ja
Garantie (5 Jahre / 10 Jahre)	ja / opt.
Zertifikate und Zulassungen	www.SMA.de
Zubehör	
Batterieleitungen / Batteriesicherungen	opt. / opt.
Schnittstellen (RS485 PB / Multicluster PB)	opt. / opt.
erweiterter Generatorstart "GenMan"	opt.
Lastabwurfschütz / externe Batteriestrommessung	opt. / opt.
Stand: März 2009	
Typenbezeichnung	SI 5048

Tabelle 7: Technische Daten SMA Batteriewechselrichter Sunny Island

Um eine optimale Laderegelung der Batterie zu erreichen, kann bei geringem Ladezustand der Batterie auch ein Lastabwurf erfolgen. Dann werden Verbraucher mit niedriger Priorität vom Netz getrennt. Auch bei zu hohem Energieangebot kann die Einspeisung von solarer oder KWK-Energie abgeschaltet werden, um die Batterien zu schonen. Mit dieser Ladereglung erhalten die Batterien immer den optimalen Ladegrad und damit eine maximale Lebensdauer. (Bruno Burger, 1999)

Die Entladung der Batterien darf besonders in den Zeiten der Nichtbewirtschaftung im Winter nicht unter 50-% abfallen, da sonst die Kapazität darunter leiden würde und die Batterien schon nach kurzer Zeit wieder ausgetauscht werden müssten. Das wir durch einen Mini-PV-Generator erreicht, der an einer schnee- und verschattungsfreien südseitigen Stelle montiert wird. Die DC-Laderegler sichern die Batterieladung und falls gewünscht auch den Betrieb eines Mobilfunksenders (GSM) zur Übermittlung von Wetter- und Anlagendaten ins Tal.

7. Effiziente Optimierung der vorhandenen Energieformen

Das generelle Ziel ist die optimale Ausnutzung der vorhandenen Energieträger unter der Prämisse der Reduzierung der BHKW-Laufzeit auf Grund der Umwelt- und Lärmbelastungen (Heizöltransport > Trinkwassergefährdung; Abgas-/Lärmemissionen). Dazu sind eine sorgfältige Bewertung der potenziellen Maßnahmen und eine intelligente Verknüpfung der einzelnen Systembauteile notwendig.

7.1 Installation eines Stromspeichers

Durch einen Stromspeicher können die Differenzen des Einspeise- und Lastprofils kompensiert, und vorhandene Energieressourcen bei Überschuss z.B. der Wasserkraft während der Nachtstunden zwischengespeichert werden.

Zusätzlich kann das BHKW durch den Speicher während seiner Laufzeit auf Nennlast betrieben werden, was den Verstromungs- und Wärmewirkungsgrad im optimalen Betriebspunkt hält.

Außerhalb der Hüttenbetriebszeiten muss zur Erhaltungsladung der Batterie (bei Blei-Gel-Batterien 2-5 %/Monat; (Wikipedia, Akkumulatoren, 2010)) ein Photovoltaik-Modul auf Südseite des Hauptgebäudes sicher geschützt vor Schneebedeckung angebracht werden.

7.2 Option: Installation einer PV-Anlage

Die berechnete PV-Anlage mit einer Leistung von ca. 8,2 kW_{peak} kann während der Benutzungsperiode von Juni-September eine kumulierte Stromausbeute von ca. 3900 kWh erbringen und in den Stromspeicher einspeisen. Aufgrund der hohen Grundlast könnte der Solarstrom nur ca. 20 % des Strombedarfs decken.

7.3 Auswirkungen und Bewertung der vorgeschlagenen Maßnahmen

Die Auswirkungen der oben genannten Maßnahmen sind im Folgenden im Vergleich mit und ohne Photovoltaikunterstützung in verschiedenen Diagrammen unter Volllastbedingungen dargestellt:

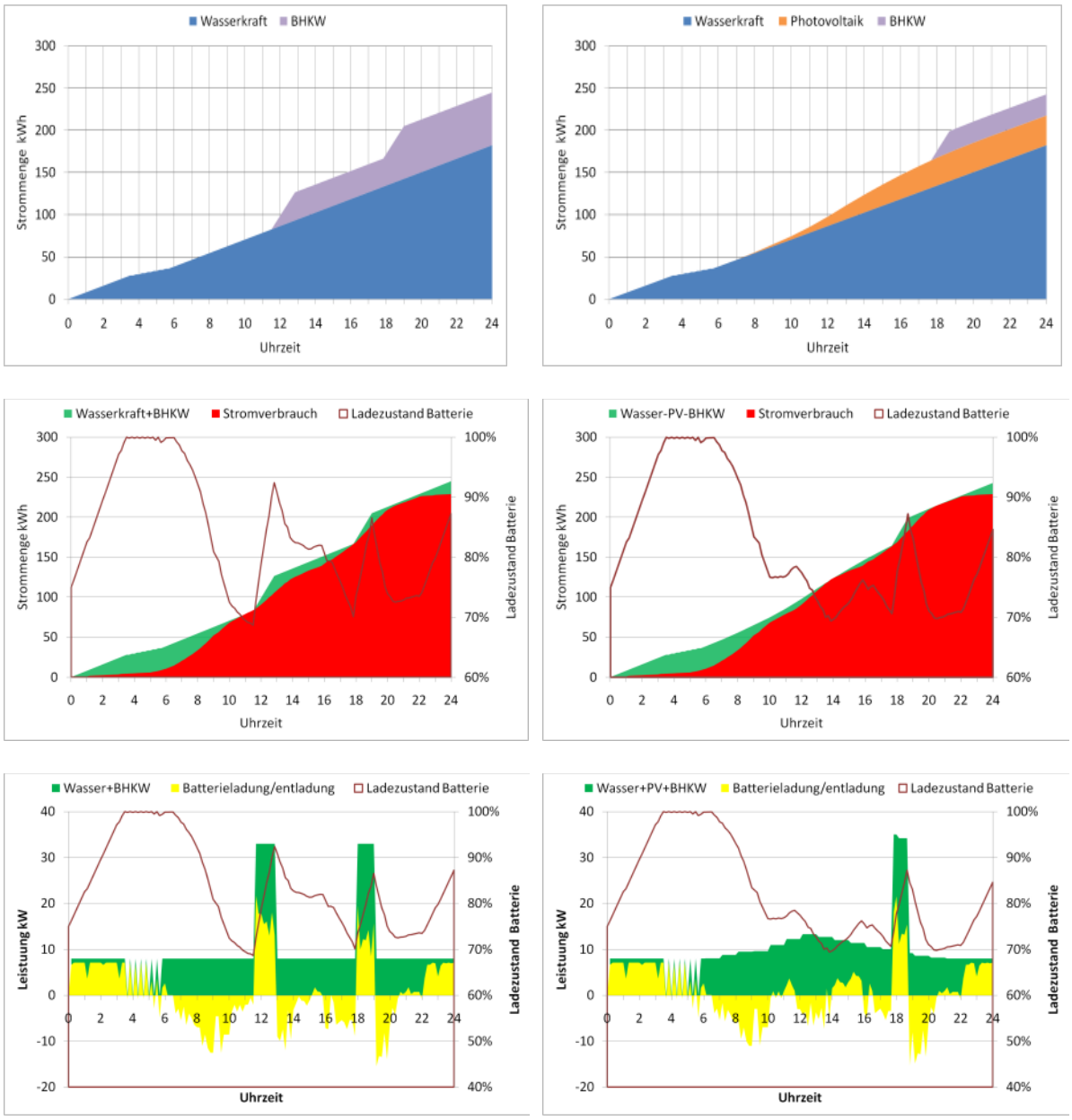

Abbildung 21 Stromeinspeisung und Strombilanzen nach Energieträger

Bei der Bewertung des Szenarios ohne PV wird deutlich, dass durch die Einrichtung des Batteriespeichers das hohe Potenzial der Wasserkraft im Gegensatz zur derzeitigen Situation zu praktisch 100 % genutzt werden kann. Die BHKW-Laufzeiten können unter Vollastbedingungen von ca. 14 h auf 2,5 h zu den Spitzenverbrauchszeiten während der Kochphasen am Mittag und Abend reduziert werden, was zusammen mit dem optimalen Betrieb unter Nennlast, den Dieselverbrauch von 85 auf 20 l/Tag schrumpfen lässt.

Die Photovoltaik könnte unter diesen Bedingungen im Mittel nur 15,2 % des Volllastbedarfs decken und die Laufzeit des BHKW zusätzlich um 1,5 h senken, was 12 l Diesel entspricht.

Im Teillast/Durchschnitts-Szenario (Tagesstromverbrauch ca. 150 kWh) reicht die Wasserkraft unter der gegebenen Leistungsannahme zur Deckung vollständig aus, hier würde die Photovoltaik keine zusätzliche Einspeisung erbringen.

Grundsätzlich beruhen diese Betrachtungen nur auf theoretischen Berechnungen der Strombilanz, die Wärmeseite des BHKW wird hier nicht berücksichtigt. Es wird allerdings deutlich, dass durch den hohen Wasserkraft-Stromanteil die Laufzeit des BHKW so weit reduziert wird, so dass eher ein Wärmemangel entsteht, der durch geeignete Maßnahmen (z.B. Zuheizung mit Strom, Solarthermie, Gastherme) aufgefangen werden muss.

In einer praxisnahen Betrachtung würde die Laufzeitreduzierung des BHKW nicht so ausgeprägt ausfallen wie in dem theoretisch berechneten Szenario, da man in Hochlastzeiten grundsätzlich aus Gründen der Batterieschonung den Strombezug über das BHKW laufen lassen würde. Zusätzlich ist der notwendige Wärmebedarf sehr wirtschaftlich durch die nutzbare Abwärme des BHKW zu decken, was auch für längere Laufzeiten spricht.

8. Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen ist neben der zukünftigen Versorgungssicherheit und der Umweltfreundlichkeit ein entscheidendes Kriterium. Es werden zwei unterschiedliche Investitionsvarianten zur autarken Energieversorgung vorgestellt.

1. BHKW, Batterie, Wasserkraft und PV-Generator
2. BHKW, Batterie und Wasserkraft

Um die beiden Szenarios miteinander vergleichen zu können wurden alle Generatoren und Speicher als Neuinvestition angenommen. Hier wurde nicht berücksichtigt, das zum Beispiel das Kleinwasserkraftwerk über seine Nutzungsdauer bereits abgeschrieben ist. Dieser Ansatz ist sinnvoll, da die im folgenden dargestellten Gesamtkosten pro kWh dann auch wieder Rücklagen für Neuinvestitionen beinhalten.

Die Wasserkraftanlage wurde mit einem Preis von 4000 EUR/kW (Indinger, 2008) angesetzt, so dass sich zusammen mit den baulichen Maßnahmen eine Investitionssumme von 50.000 EUR ergab.

Die spezifischen Investitionskosten A eines neues Rapsöl-BHKWs verhalten sich nach Emberger wie folgt:

$$A = 5261{,}5\ p^{-0{,}4001}$$

Mit p als gewünschte Nennleistung in kW. Das ergibt bei einem, für die Rappenseehütte ermittelten Bedarf von 35 kW elektrischer Leistung eine Investition von 45.000,00 EUR. (Peter Emberger, 2006)

Die Anschaffungsneuwerte der zwei Hybridsysteme:

BHKW, Batterie, Wasserkraft und PV-Generator		**EUR**
Kleinwasserkraftwerk		50.000,00
BHKW Rapsöl		45.000,00
PV-Module	Kyocera	30.000,00
Strangwechselrichter	Sunny Boy	2.400,00
Batterieverband	Sonnenschein	26.000,00
Batteriewechselrichter	Sunny Island 5048	13.000,00
Laderegler	Smart Load 6000	6.000,00
Montage		5.000,00
WEB-Box		2.200,00
		179.600,00

Tabelle 8: Investition Szenario 1

BHKW, Batterie und Wasserkraft		**EUR**
Kleinwasserkraftwerk		50.000,00
BHKW Rapsöl		45.000,00
Batterieverband	Sonnenschein	26.000,00
Batteriewechselrichter	Sunny Island 5048	13.000,00
Laderegler	Smart Load 6000	6.000,00
Montage		3.500,00
WEB-Box		2.200,00
		145.700,00

Tabelle 9: Investition Szenario 2

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden folgende Randbedingungen angenommen.

Stromquelle	Nutzungsdauer Jahre	Wartungskosten % der Investkosten	Preissteigerung
Wasserkraft	50	1 %	5 %
BHKW	20	1500 EUR + 1 EUR/h	5 %
PV	20	1 %	5 %
Batterie/Infrastruktur	10	2 %	5 %

Tabelle 10: Randbedingungen für Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Investitionskosten gehen als lineare Abschreibung über die Nutzungsdauer in die Kostenrechnung ein. Als Brennstoffkosten wurde mit den aktuelle Marktpreis vom 12.05.2010 (Heizöl 0,70 EUR/l, Rapsöl 1,00 EUR/l) gerechnet. Die Preissteigerung wurde für die Wartungskosten und die Brennstoffkosten zum Ansatz gebracht.

Um 19.000 kWh elektrische Energie bereit zu stellen, werden aktuell, wie beschrieben, ein Diesel-BHKW und Wasserkraft verwendet. Der Wasserkraftanteil soll in Zukunft je nach Wahl des Energiemixes von heute 36% auf bis zu 95 % steigen. Die aktuelle und zukünftige Verteilung der Energiebereitstellung durch die verschiedenen Energieträger ist in folgenden Kreisdiagrammen dargestellt.

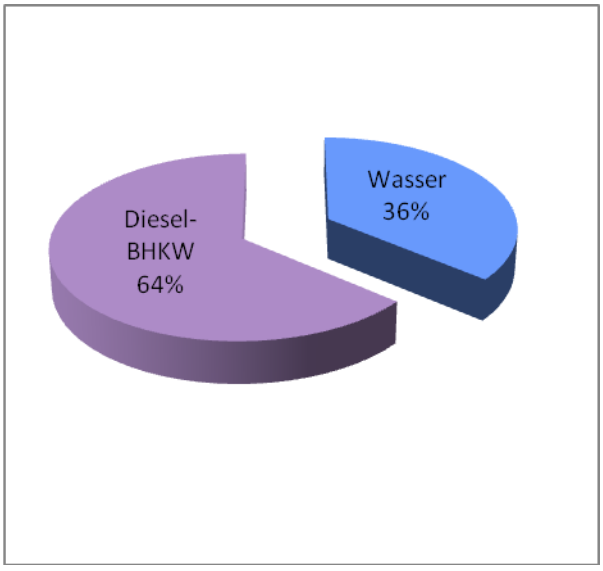

Abbildung 22 Aktuelle Energieversorgung

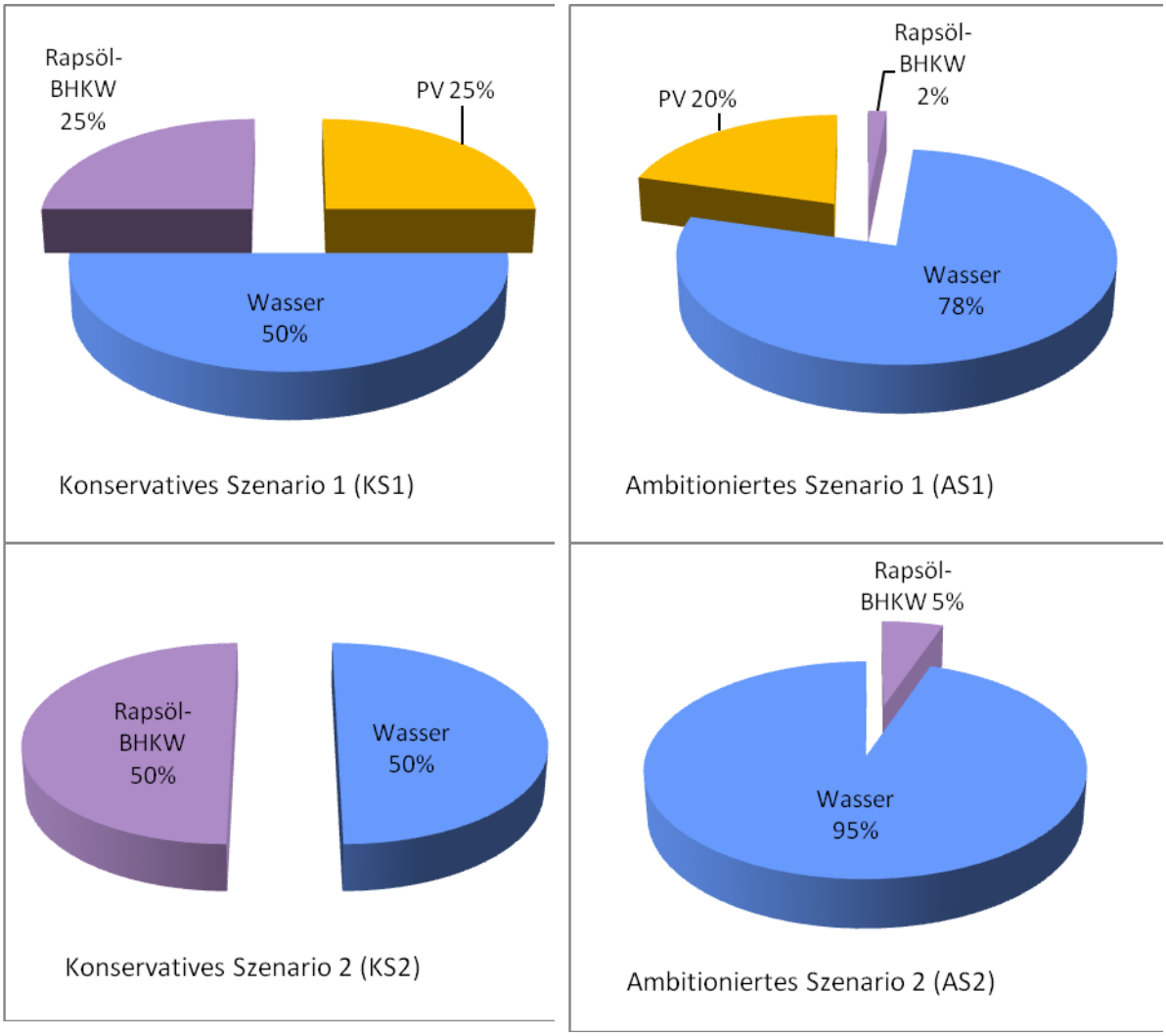

Abbildung 23 Zukünftige Energieversorgung - konservativ und ambitioniert berechnet

Abbildung 24 zeigt die Kosten und den Ölverbrauch der dargestellten Szenarien. Die Stromquellen sind wie in den Tortendiagrammen von Abbildung 23 farbig unterschiedlich markiert (Blau=Wasser, Lila=BHKW, Gelb/Orange=PV, zusätzlich: Grün = Batterie Grau = Öl/Diesel)

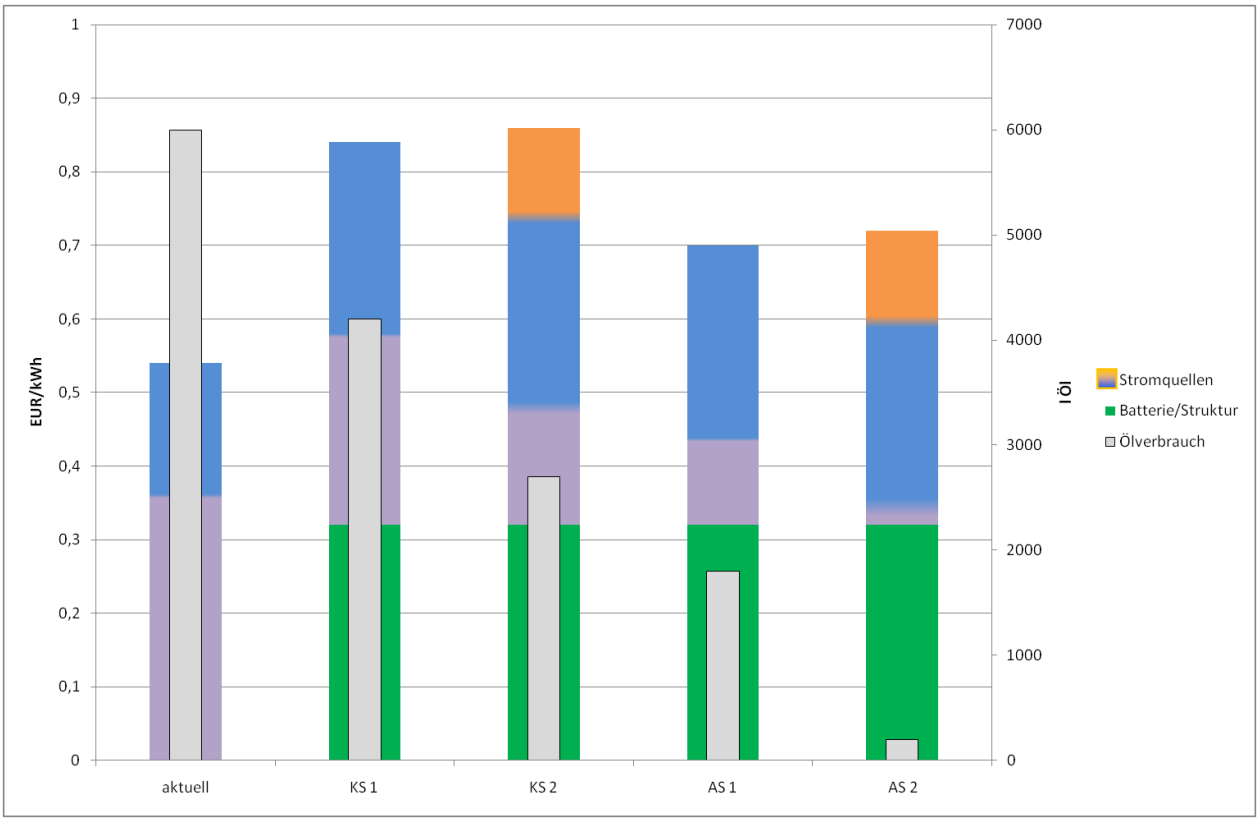

Abbildung 24 Kostenvergleich - aktuelle und zukünftige Energieversorgung

In der Jahresbetrachtung liegen die Arbeitskosten pro erzeugter kWh mit der aktuellen Situation (BHKW, Wasserkraft, kein Speicher) bei 0,54 EUR/kWh. Durch die neue Strom-Infrastruktur können die reinen Stromerzeugungskosten (Kosten ohne Batterie) gegenüber der aktuellen Situation um 0,04 EUR/kWh auf 0,50 EUR/kWh reduziert werden, wobei grundsätzlich die PV-unterstützten Systeme auf Grund der höheren Investitionskosten geringfügig ungünstiger abschneiden.

In der langfristigen Betrachtung über die Lebensdauer von 20 Jahren, wo die relativ niedrigen Wartungskosten der erneuerbaren Energien wie PV und Wasser sich positiv auswirken, und die Preissteigerungen des Kraftstoffs für das BHKW als kritischer Kostenfaktor gesehen werden müssen, kann dieser Kostennachteil überkompensiert werden. So ergibt sich unter den oben genannten Randbedingungen ein kumulierter Gesamtkostenvorteil der PV-unterstützten Systeme von 2-4 %, je nach Annahme des verwendeten Energiemixes.

Zusätzlich kann die Laufzeit des BHKW, mit allen untersuchten Szenarien, und somit auch der Brennstoffverbrauch, deutlich reduziert werden.

9. Fazit und Empfehlungen

Alpenvereinshütten, die energietechnisch im Allgemeinen als Inselanlagen betrieben werden, weisen je nach Lage, Gästezahl (Tages-/Übernachtungsgäste), Elektrogerätebestand und Bewirtungsniveau eine weite Spanne des Stromverbrauchs von <10 - 250 kWh/Tag (DAV, Solare Berghütten, EURALP, 2010) auf. Je größer der Strombedarf, desto geringer wird unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten der Deckungsgrad durch Photovoltaik sein. In Hütten der Größenordnung der Rappenseehütte wird nach Vorgaben des DAV ein solarer Deckungsgrad von 25 % als sinnvoll erachtet.

Grundsätzlich ist bei der Auslegung der Energieversorgung eine möglichst detaillierte Betrachtung der Verbrauchssituation anzustellen, und die verfügbaren Versorgungsoptionen auf ihr jeweiliges Potenzial zu untersuchen. Die wirtschaftlichste Lösung wird durch eine optimale Abstimmung von Einspeisung und Verbrauch und durch intelligentes Lastmanagement erreicht.

Im Rahmen einer langfristigen Betrachtung stellt die geplante PV-Anlage eine wirtschaftliche Energieversorgung der Berghütte zur Verfügung. Zusätzlich ist sie durch ihre Umweltfreundlichkeit auch ein Aushängeschild für eine nachhaltige Nutzung der Natur.

Als großer Hebel auf der Verbrauchsseite ist der Einsatz von energieeffizienten Geräten bzw. einer energiesparenden Infrastruktur anzusehen, der das Stromverbrauchsniveau insgesamt drücken kann. Völlig ausgeklammert wurden auch die thermischen Gegebenheiten des Gebäudes sowie der Bereich Wasserversorgung und Entsorgung, die es bei einem ganzheitlichen ökologischen Ansatz genau zu analysieren und unter Umständen ebenfalls zu verbessern gilt.

Von Seiten der elektrischen Energieversorgung jedenfalls kann mit dem oben beschriebenen modernen Konzept die durchschnittlichen Laufzeiten des BHKWs in Zukunft signifikant reduziert werden. Das BHKW muss nur noch in Spitzenlastzeiten eingesetzt werden. Im Gegensatz zu heute, wo der Einsatz von Elektrogeräten zeitgleich mit den Laufzeiten des Dieselaggregats erfolgen muss, steht in Zukunft kontinuierlich elektrische Energie zur Verfügung. Die Versorgung ist dann wesentlich komfortabler und kann mit der von netzgebundenen Haushalten verglichen werden.

Die bisher langen Laufzeiten bei niedrigen Drehzahlen hatten einen denkbar ungünstigen Wirkungsgrad zur Folge. Weiterhin verursachte der Betrieb unter Teillast einen hohen Verbrauch und damit hohe Dieselkosten. Die Belastung der Umwelt durch Verschmutzung des Grundwassers bei Transport und Lagerung wird in Zukunft mit jedem gesparten Liter Diesel zurückgehen.

Die bisher pro Jahr verbrauchten 6.000 Liter Diesel entsprechen auf den unteren Heizwert bezogen etwa 60.000 kWh elektrischer Arbeit (Dreyer und Bosse, 2010). Es ergibt sich damit für ein Heizöl mittlerer Sorte (Quaschning) eine CO_2-Belastung von

$$M_{co2} = 0{,}28 \frac{kg}{kWh} \cdot 60.000 kWh = 16.800\ kg$$

Im konservativen Szenario, das auf der Basis realistischer Annahmen bezüglich des Strommixes beruht, muss das BHKW nur 350 h in den Spitzenlastzeiten zugeschalten werden. Der Kraftstoffbedarf sinkt auf 40 %

$$M_{co2} = 0{,}28 \frac{kg}{kWh} \cdot 24.000 kWh = 6.720\ kg$$

und vermeidet somit 10 Tonnen CO_2 pro Jahr. Neben der Luftverschmutzung wird auch der Lärm durch den Betrieb des BHKWs und die Abgase weiter abnehmen.

Eine komplette Substitution des BHKW ist jedoch wegen des sehr hohen Strombedarfs nicht realistisch und auch nicht mit ausreichender Sicherheit möglich, da die alternativen Energien wie Wasserkraft und Solarstrom natürlichen Schwankungen unterliegen und somit die Energieressourcen nicht ausreichend abgesichert sind.

Um über das hier beschriebene hinaus die ökologische Situation auf der Rappenseehütte weiter zu verbessern, wird der Einsatz eines modernen Pflanzenöl-BHKW mit verbesserter Wärmeauskoppelung empfohlen. Damit kann Strom und Wärme parallel mit hohem Wirkungsgrad durch Kraft-Wärme-Koppelung erzeugt werden und eine Umweltgefährdungen durch die alten Dieselaggregate vermieden werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Alpenkonvention. (1995). *Alpenkonvention, Ständiges Sekretariat.* Innsbruck: http://www.alpconv.org/home/index_de.

Bruno Burger, G. C. (1999). *Modularer Batteriewechselrichter für den Einsatz in Hybridsystemen, .* Kassel.

Büchel, P. (2010). *Büchel Architekten, PowerPoint Präsentation von Peter Büchel auf dem 19.01.2010.* Benediktbeuern: 10. Internationa-len Fachseminar des DAV „Umweltgerechte Konzepte für Berg- und Schutzhütten. Innovative Projekte im Alpenraum“ .

DAV. (1991). *Leitbild, Deutscher Alpenverein e.V.*

DAV. (2010). *Solare Berghütten, EURALP.* Retrieved from http://cms.alpenverein.de/download_file.php?id=133&showfile=1

DAV, S. A.-K. (2010). *Webseite.* Kempten: www.alpenverein-kempten.de.

Deubler. (2008). *10 Jahre Hybridsystem „Starkenburger Hütte“ - Betriebserfahrungen mit einem innovativen Systemkonzept.* Bad Staffelstein: Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e.V. Bericht zum 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad.

DGS. (2006). *Sonnenforum der DGS vom 05.12.2006, Tagungsband S.31.*

Dörr, R. (1992). *Verordnung über das Naturschutzgebiet „Allgäuer Hochalpen".* Augsburg: Amtsblatt der Regierung von Schwaben, Landesentwicklung und Umweltfragen.

Dreyer und Bosse. (2010, 06 24). Telefonat mit Projektplanung. Gorleben.

Elektro-Mechanik Meisl GmbH. (2007). *Foto: Turbine und Generator Rappenseehütte.* Rappenseehütte, Allgäuer Alpen.

ETH, & SAC, S. A. (2008). *Neue Monte Rosa Hütte.* Zürich; http://www.neuemonterosahuette.ch/260_projekt.php Stand 17.04.2010.

Fraunhofer ISE. (2002). *Planungsleitfaden für Energiekonzepte von Berghütten.*

G.R. Träumer, A. B. (2007). *Abschlussbericht Mindelheimer Hütte, AZ 17400/30 und 48.* Mindelheim: Deutsche Bundesstiftung Umwelt und DAV-Sektion Mindelheim.

Genève, U. d. (2010). PVsyst 5.10.

GOOGLE EARTH . (2010).

GOOGLE EARTH. (2010). *http://earth.google.com/intl/de/*.

Hubert Deubler Elektromechanik Meisl GmbH. (2010, 06 21). aus einem Telefongespräch mit Hubert Deubler. Berchtesgaden.

Indinger, A. (2008). *Techno-ökonomische Bewertung von Klein- bzw. Kleinstanlagen vorwiegend für die Stromerzeugung.* Wien: Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaf.

Kaltschmitt, S. (2006). *Erneuerbare Energien, 4.Auflage.* Leipzig: Springer.

Kassler Symposium Energie-Systemtechnik, Bruno Burger. (1999). *Modulare Batteriewechselrichter für den Einsatz in Hybridsystemen.* Kassel.

Koeppen, P. D. (2010). Vorlesungsmitschrift - Generatoren für Windenergieanlagen. Lüchow, Hamburg.

Kyocera. (2010). *Installation Manual KD 205 PH -2PU, KD 210 PH -2PU.*

Lawinenwarnzentrale. (2006). *Anleitung zum Abschätzen einer aktuellen Schneelast.* München: Bayer. Landesamt für Umwelt.

Moré, P. D.-I. (n.d.). *HAW Solar e.V.* Retrieved 06 2010, from http://users.etech.haw-hamburg.de/users/more/Solar/index.htm

Moré, P. D.-I. (2010). *HAW Solar e.V.* Retrieved from http://users.etech.haw-hamburg.de/users/more/Solar/index.htm

Normungsinstitut, Ö. (2005). *Schneelastberechnung nach OENORM B 1991-1-3.* Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

Peter Emberger, K. T. (2006). *Pflanzenöl BHKW - Technische Grundlagen, Planung und Wirtschaftlichkeit.* Straubing: Technologie und Förderzentrum Bayern.

Quaschning, V. (n.d.). *Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe*. Retrieved 06 2010, from http://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index.php

Rheinland, T. (2010). *Prüfungen nach IEC 61215: „Terrestrische Photovoltaik (PV) Module mit kristallinen Solarzellen - Bauarteignung und Bauartzulassung“.* Köln: TÜV Rheinland.

SMA Solar Technology AG, Michael Ebel. (2010). Niestetal.

Touristenklub, Ö. (2010). www.schiestlhaus.at (Stand 12.04.2010).

Universität Genf. (2010). *http://www.pvsyst.com/5.2/index.php*.

Wikipedia. (2010). http://de.wikipedia.org/wiki/Passivhaus (Stand 12.04.2010).

Wikipedia. (2010). *Akkumulatoren.* http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator.