



Thema der Arbeit

Photovoltaik-Anlagen

Verfasser

Markus Schäfer

Anlass

Facharbeit Leistungskurs Physik

Betreuender Lehrer

Herr Leiskau

Datum der Abgabe

07. März 2008

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

Geschichtliche Entwicklung

2. Photovoltaik

Vorraussetzungen (Sonne als Energiequelle)

2.1.1 Verfügbare Strahlung

Das Photovoltaische Prinzip

Aufbau photovoltaischer Zellen

Typen von Solarzellen

Kristalline Solarzellen

Dünnschicht-Solarzellen

Photovoltaische Module (PV-Module)

2.3.1 Aufbau eines PV-Moduls

Photovoltaische Systeme

Netzverbundsysteme

Inselsysteme

3. Beschreibung einer Anlage

Technische Daten

Energieertrag

4. Anhang

Literaturverzeichnis

Erklärung über selbstständige Erstellung der Facharbeit

Arbeits- und Zeitplan

1. Einleitung

1.1 Geschichtliche Entwicklung ¹

Der photoelektrische Effekt wurde bereits 1839 von dem französischen Physiker Alexandre Edmond Becquerel entdeckt.

1905 gelang es Albert Einstein diesen Effekt richtig zu erklären, wofür er im Jahr 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt.

Ab diesem Zeitpunkt befassten sich viele Physiker mit dem photoelektrischen Effekt und versuchten diesen weiter zu entwickeln. In den 1950er Jahren gelang es den Physikern Daryl Chapin, Calvin Fuller und Gerald Pearson die erste wirkungsvolle Siliziumzelle herzustellen.

Ende der 1950er Jahre wurde mit dem „Vanguard I – Projekt“ ² die erste technische Anwendung für den photoelektrischen Effekt gefunden.

Mit der von nun an immer weiter wachsenden Entwicklung der Raumfahrt in den 1960er und 1970er Jahren wurden auch entscheidende Fortschritte in der Photovoltaikzellen-Entwicklung gemacht, da man im All immer mehr elektrische Energie braucht und diese möglichst aus der Solarenergie der Sonne schaffen wollte.

Zudem kam in den 1970er Jahren bedingt durch Energiekrisen ein gestiegenes Umweltbewusstsein. Politisch wurde versucht, umweltfreundliche Energiegewinnung durchzusetzen, so wurde den Menschen durch Maßnahmen wie dem „100.000 Dächer Programm“ ³ und dem „Erneuerbare – Energien – Gesetz (EEG)“ ⁴ ein erheblicher finanzieller Anreiz geboten, auf umweltbewusste Energiegewinnung zu setzen und diese zu nutzen und zu fördern.

Im Jahr 2005 erreichte so die gesamte Nennleistung ⁵ aller in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen ca. 1 Gigawatt.

¹ vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Photovoltaiik

² „Vanguard I – Projekt“: Amerikanisches Projekt, um einen Satelliten in die Erdumlaufbahn zu befördern.

³ „100.000 Dächer Programm“: Förderprojekt, welches Privatpersonen und kleinen Unternehmen mittels niedriger Zinsen für Kredite die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen ermöglichte.

⁴ „Erneuerbare – Energien – Gesetz (EEG)“: Gesetz zur Förderung von Anlagen, die Strom mittels Wasser, Deponie-, Klär- und Grubengas, Biomasse, Windenergie und solarer Strahlungsenergie (Photovoltaik) erzeugen. Für die Betreiber wird ein fester Vergütungssatz für den so erzeugten Strom festgelegt.

⁵ Nennleistung: Bei Photovoltaikanlagen wird die abgegebene elektrische Leistung unter standardisierten Testbedingungen (Bestrahlungsstärke 1000 W/m², Modultemperatur 25 °C) angegeben.

2. Photovoltaik

2.1 Voraussetzungen (Die Sonne als Energiequelle)

Energielieferant der Photovoltaikanlagen ist die Solarstrahlung der Sonne. Die Sonne ist eine Kugel aus sehr heißer, gasförmiger Masse, ihr Durchmesser beträgt $1,39 \times 10^9$ m (Im Vergleich dazu der Durchmesser der Erde:

$1,27 \times 10^7$ m). Durch die exzentrische Umlaufbahn der Erde ändert sich der Abstand zwischen Erde und Sonne kaum (ca. 1,7 %).

Ihre effektive Strahlungstemperatur beträgt 5.777 K.

Durch die gleichbleibende Strahlung und die annähernd konstante räumliche Beziehung zwischen Erde und Sonne ist die Intensität der Sonnenstrahlung – zumindest außerhalb der Erdatmosphäre – nahezu gleichmäßig. Diese Strahlung bezeichnet man als extraterrestrische Strahlung, sie beträgt etwa 1.367 W/m^2 .¹

Die Sonnenenergie ist die einzige unausschöpfliche Exergiequelle (Exergie ist der nutzbare Anteil der Energie, der in jedem Umwandlungsprozess zu Anergie wird. Anergie ist der nicht mehr nutzbare Anteil der Energie.).²

Wenn man von Energiespeicherung spricht, müsste man folglich also korrekterweise von Exergiespeicherung sprechen, denn nur die Exergie ist für uns brauchbar.

Die Nutzung der Solarstrahlung zur Deckung des Energiebedarfs ist also die einzige Möglichkeit die in fossiler Form gespeicherten Exergie zu schonen, da diese sonst in wenigen hundert Jahren verbraucht wäre.

2.1.1 Verfügbare Strahlung

Zwei Phänomene beeinflussen die Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche erheblich:

- die atmosphärische Streuung durch Luftmoleküle, Wasser und Dunst
- die atmosphärische Absorption durch O_3 , H_2O und CO_2

¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 66 Abschnitt 1

² vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 66 Abschnitt 3

Die folgende Tabelle¹ zeigt die Einstrahlung auf der Erde (Im Folgenden „Globalstrahlung“ genannt) bei unterschiedlichen Wetterbedingungen:

Wolkenloser, blauer Himmel	Dunstig, Sonne als Scheibe sichtbar	Bewölkter Himmel
600 – 1.000 W/m ²	200 – 400 W/m ²	50 – 150 W/m ²

2.2 Das Photovoltaische Prinzip

Der photovoltaische Effekt bedeutet die Umwandlung von Licht in Elektrizität. Bereits im Jahre 1839 beobachtete der französische Physiker Edmond Becquerel, dass eine elektrische Spannung entsteht, wenn man zwei gleiche Elektroden in eine schwach leitende Lösung hält und anschließend eine der beiden Elektroden beleuchtet.

Licht dringt in eine photovoltaische Zelle ein und überträgt genügend Energie, um Elektronen freizusetzen. Eine Potentialbarriere in der Zelle trennt die positiven und negativen Ladungsträger voneinander, sodass eine elektrische Spannung entsteht.

Diese elektrische Spannung kann dann genutzt werden, um einen Strom in einem elektrischen Stromkreis fließen zu lassen.²

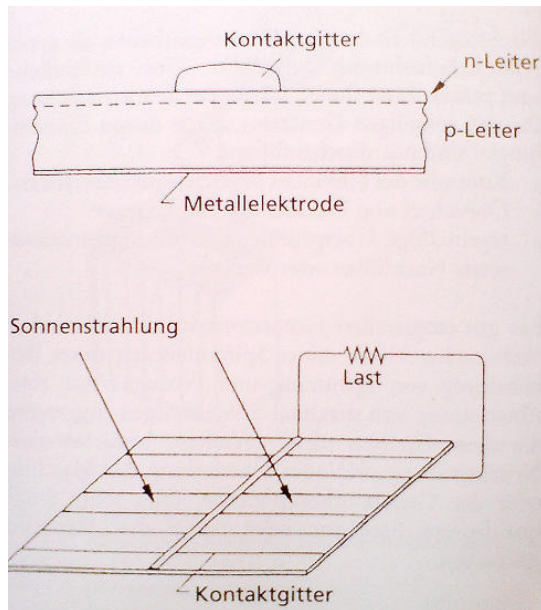
2.2.1 Aufbau photovoltaischer Zellen

Das Grundelement eines photovoltaischen Moduls ist die Solarzelle. Diese Zelle absorbiert das Licht und wandelt es in Elektrizität um. Folgende Abbildung³ veranschaulicht den Aufbau einer Solarzelle:

¹ „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 66 Tabelle 5.1

² vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 118 Abschnitte 1,2

³ „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 118 Abbildung 13.1



Oben: Schnitt durch eine Silizium-Solarzelle

Unten: Schematische Darstellung einer Solarzelle mit dem Kontaktgitter

Eine Solarzelle besteht aus einer dünnen Scheibe Halbleitermaterial, meistens Silizium. Ein Halbleiter ist ein Material, dessen elektrische Eigenschaften zwischen denen eines Leiters und denen eines Isolators liegen, sodass es nur geringfügig elektrisch leitend ist.

Dem Halbleiter werden sehr geringe Mengen von Fremdatomen hinzugefügt. Diesen Prozess nennet man Dotierung. Durch diesen Prozess werden in dem Halbleiter zwei unterschiedliche Schichten erzeugt, zum einen die „n-leitende“, zum anderen die „p-leitende“ Schicht. Die n-leitende Schicht weist eine erhöhte Anzahl von Elektronen ($n = \text{negativ}$) auf, die p-leitende Schicht hingegen besitzt eine kleinere Menge Elektronen ($p = \text{positiv}$). Es entstehen so genannte „Löcher“, die auch als Defektelektronen bezeichnet werden.

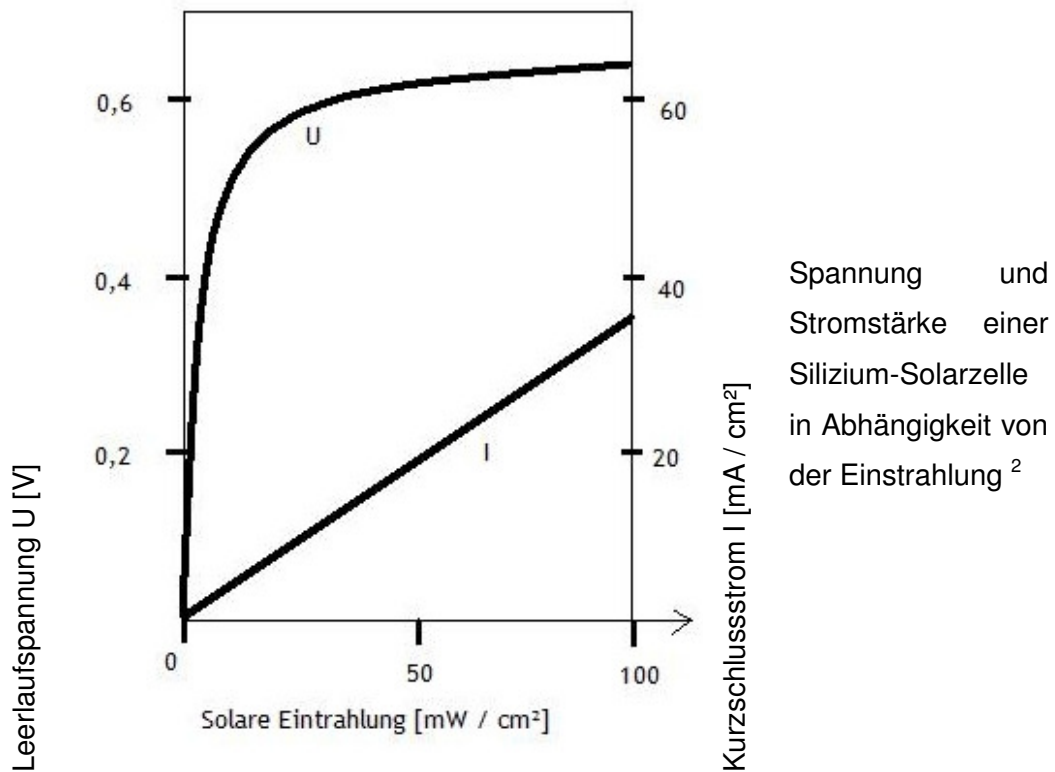
Will man eine n-leitende Schicht erzeugen, führt man die Dotierung mit einem Element der V. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente (z.B. Phosphor) durch. Für eine p-leitende Schicht führt man die Dotierung mit einem Element der III. Hauptgruppe (z.B. Bor) durch.

Zwischen den beiden Schichten entsteht nun ein p-n-Übergang, welcher die grundlegende Bedeutung für die Funktion der Solarzelle hat.¹

¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 118 Abschnitte 3,4,5,6, Seite 119 Abschnitt 1

Fällt Licht auf die Solarzelle, wird es größtenteils in der Absorbierschicht aufgenommen, ein kleiner Teil des Lichtes wird jedoch schon in der so genannten Fensterschicht der Zelle absorbiert. Diese Schicht bildet die Schutzschicht der Zelle und kann das Licht nicht verlustfrei durchlassen.

In der Absorbierschicht werden Elektronen-Defektelektronen-Paare erzeugt, die in dem Gebiet des p-n-Übergangs aufgrund des dort vorhandenen elektrischen Feldes getrennt werden. Diese Ladungsträger führen nun zu einem Stromfluss über einen Draht, der mit den beiden Seiten der Zelle verbunden ist. Der in den Zellen erzeugte Strom ist proportional zu der eingestrahlt Lichtmenge, also der Anzahl von Photonen, die in die Zelle eindringen. So stellt man fest, dass der Strom sowohl von der Zellenfläche, als auch von der Lichtintensität abhängig ist.¹



¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 118 Abschnitt 6, Seite 119 Abschnitt 1

² „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 119 Abbildung 13.2

2.2.2 Typen von Solarzellen

2.2.2.1 Kristalline Solarzellen

Am häufigsten wird das Material Silizium verwendet, denn die Zellen aus monokristallinem Silizium (Silizium aus einem einzigen Kristall) gibt es heute schon mit einem Wirkungsgrad von über 20% (der maximale Wirkungsgrad von Silizium liegt bei 29%). Häufiger wird jedoch polykristallines, auch multikristallines Silizium (Silizium aus mehreren Kristallen) genannt, verwendet, da dieses wesentlich einfacher und günstiger herzustellen ist. Allerdings hat polykristallines Silizium einen kleineren Wirkungsgrad, welcher jedoch nur unwesentlich geringer ist als der des monokristallinen Siliziums.

Es gibt noch ein weiteres kristallines Material, welches wesentlich effektiver ist. Hierbei handelt es sich um Gallium-Arsenid. Aufgrund der deutlich höheren Herstellungskosten wird dieses Material jedoch nur für hocheffiziente Zellen, beispielsweise in der Raumfahrt, genutzt. ¹

2.2.2.2 Dünnschicht-Solarzellen

Dünnschicht-Solarzellen wurden entwickelt, um die Herstellungskosten für Photovoltaikanlagen zu senken. Sie benötigen weniger Material und lassen sich einfacher und schneller herstellen als kristalline Solarzellen.

In diesen Zellen verwendet man anstelle von kristallinem Silizium amorphes Silizium. Dieses ist wesentlich günstiger herzustellen, außerdem braucht man viel weniger Energie für die Herstellung. Damit wird auch weiter der Aspekt des Energiesparens betrachtet.

Der Nachteil des amorphen Siliziums ist der geringere Wirkungsgrad von nur ca. 10%, deswegen findet man diese Zellen eher nicht auf Gebäuden, sondern auf Kleingeräten wie z.B. Taschenrechnern. ²

¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 119 Abschnitt 2

² vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 119 Abschnitt 3

2.3 Photovoltaische Module (PV-Module)

Das PV-Modul ist das Grundelement in jeder gebäudeintegrierten Photovoltaikanlage. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Module bestimmt die Spannung des Systems, die Anzahl der parallel geschalteten Module bzw. Modul-Strängen bestimmt die Stromstärke. Das Produkt der Systemspannung und der Stromstärke ist die Leistung.

Eine einzelne Silizium-Solarzelle mit einer Fläche von 100 cm² erzeugt bei voller Sonneneinstrahlung einen Strom von 3 A (Ampere) bei einer Spannung von 0,5 V (Volt). Am Anfang der Anwendung von Solaranlagen stand das Laden von 12-V-Bleibatterien im Vordergrund. Dazu brauchte man eine Modulspannung von 13-15 Volt. Aus diesem Grund besteht ein heutiges, typisches PV-Modul aus 30 bis 36 Zellen, die in Reihe geschaltet sind. Das Modul hat jetzt eine Leistung von ca. 50 W (Watt).¹

2.3.1 Aufbau eines PV-Moduls

Die oberen Schichten eines Moduls sind transparent. Die äußerste Schicht, das Deckglas, schützt das Modul vor Umwelteinflüssen, sodass die Module bei allen Witterungen einsatzfähig sind und nicht sonderlich geschützt werden müssen, beispielsweise bei Regen oder Schnee. Das Deckglas besteht aus gehärtetem (getempertem) Glas, damit es stabil genug ist, um die Module auch bei Hagel oder sonstigen Einflüssen, z.B. Wind, zu schützen.

Unter dem Glas sind die Solarzellen angeklebt, welche noch mit einer Anti-Reflex-Beschichtung versehen werden.

Nachdem das Licht das Deckglas, die Verklebung und die Anti-Reflex-Beschichtung durchdrungen hat, gelangt es in die Halbleiterschicht der Solarzelle, in der die Elektrizität erzeugt wird.

Auf der Zelloberfläche liegt ein dünnes Metallgitter, durch welches der erzeugte Strom fließt.

Unter der Zelle befindet sich eine Metallschicht, über die, mit dem Metallgitter, der Anschluss an einen externen Stromkreis hergestellt wird. Darunter befindet sich wieder eine Schicht aus Glas oder Verbundstoff.

Ein Rahmen aus Aluminium gibt dem gesamten Modul die nötige Festigkeit für den Zusammenhalt und die Montage.²

¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 121 Abschnitte 1,2

² vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 121 Abschnitte 3,4

2.4 Photovoltaische Systeme

Photovoltaische Systeme (PV-Systeme) sind modular aufgebaut: Solarzellen können in Reihe oder parallel in jeder beliebigen Zahl und Kombination geschaltet werden. PV-Systeme sind so für einen breiten Leistungsbereich realisierbar, von Milliwatt-Systemen in Uhren oder Taschenrechnern (Solarzellen hauptsächlich in Reihe geschaltet) bis zu Megawatt-Systemen für eine zentrale Stromerzeugung in Gebäuden (Solarzellen werden in Reihe geschaltet, diese Stränge werden dann parallel geschaltet, so ergeben sich eine große Spannung und Stromstärke, infolge dessen als Produkt eine große Leistung.).

Es gibt zwei unterschiedliche PV-Systeme: Einerseits die Netzverbundsysteme, die immer mit dem üblichen Stromversorgungsnetz verbunden sind und andererseits die autarken Systeme (Inselsysteme, stand-alone systems).¹

2.4.1 Netzverbundsysteme

Diese PV-Systeme werden mit dem öffentlichen Versorgungsnetz verbunden. Hierzu benötigt man einen Wechselrichter, der den erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom mit der, dem öffentlichen Versorgungsnetz entsprechenden Frequenz umwandelt.

Die nicht benötigte Energie wird somit in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist, man erhält von dem Versorgungsunternehmen eine Vergütung pro eingespeiste Kilowattstunde. Der Preis hierfür ist von Region zu Region unterschiedlich.

2.4.2 Inselsysteme

Die PV-Systeme werden hier nicht mit dem öffentlichen Versorgungsnetz verbunden, sie geben ihre Energie nur an das Hausnetz ab. Zwischen dem PV-Generator und dem Hausnetz bzw. den einzelnen Verbrauchern ist hier jedoch eine Speicherbatterie notwendig, die das schwankende Stromangebot des PV-Systems ausgleicht, sodass auch an Tagen, an denen die Sonne nicht scheint, genügend Energie vorhanden ist.

Von dieser Batterie kann der Strom direkt an Gleichstrom-Verbraucher fließen, vor Wechselstrom-Verbrauchern muss jedoch wiederum ein Wechselrichter geschaltet werden.

¹ vgl. „Photovoltaik in Gebäuden“ – Heinz Hullmann – Seite 124 Abschnitte 1-5, Seite 125 Abschnitte 1-4

3. Beschreibung einer Anlage

Die hier beschriebene Photovoltaik - Anlage befindet sich auf dem Hof Brunsiek in Dörentrup / Spork. Es handelt sich um ein Netzverbundsystem.

Installiert wurde die Anlage auf zwei Scheunendächern, der erste Teil wurde am 28. Februar 2001 errichtet, der zweite Teil folgte am 17. März 2004. Die



Errichtung beider Teilanlagen wurde durch drei Förderprogramme ermöglicht. Dies sind zum einen ein Darlehen für einen Förderkredit von der Kreditanstalt für Wiederaufbau, zum anderen das Programm „Rationelle Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher

Energiequellen“ des Landes Nordrhein-Westfalen. Des Weiteren wurde die Anlage durch die Gemeinde Dörentrup gefördert. ¹

3.1 Technische Daten

Die Anlage besteht aus 84 Solarmodulen BP Solarex MSX 120 mit einer Leistung von je 120 Watt, sowie 42 Solarmodulen vom Typ Sharp 175 Wp mit jeweils 175 Watt.

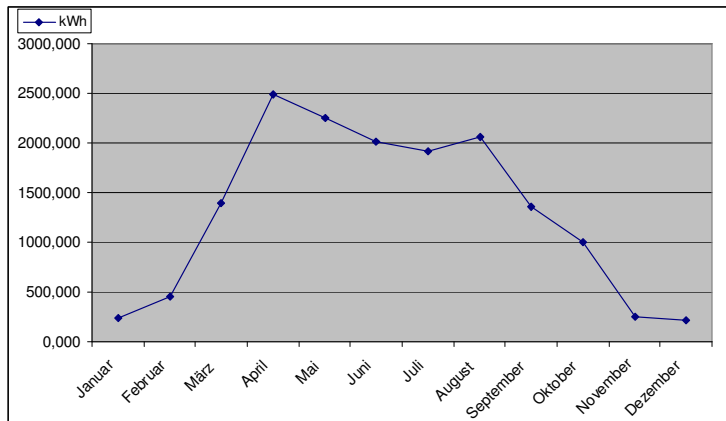
Somit hat der erste Teil der Anlage eine Gesamtleistung von 10,8 kW, der zweite Teil 8,6 kW. Beide Anlagen zusammen haben eine Leistung von 19,4 kW ^{2,3}

¹ Abbildung <http://www.brunsiek-doerentrup.de/photovoltaikanlage/1.jpg>

² vgl. <http://www.brunsiek-doerentrup.de/photovoltaikanlage/pvt.htm>

³ 1 kW = 1000 Watt; Watt ist die elektrische Leistung und ist definiert durch Spannung * Stromstärke

3.2 Energieertrag



Das Diagramm¹ stellt den Energieertrag des Jahres 2007 in den einzelnen Monaten dar, der gesamte Ertrag beider Teilanlagen zusammen betrug 15.631,574 kWh².

Zum Vergleich: Der Durchschnittsverbrauch³ eines Vier-Personen-Haushalts in Deutschland beträgt etwa 4.500 kWh.

Pro Monat wurden durchschnittlich 1.276 kWh erzeugt. In den Wintermonaten liegt der Ertrag deutlich unter 500 kWh, in den Sommermonaten hingegen meistens über 2.000 kWh.

Auffallend in dem Diagramm ist der hohe Wert für den Monat April. Normalerweise müsste dieser deutlich geringer sein, jedoch war der April 2007 ein sehr warmer und sonniger Monat, wie es sonst nicht üblich ist. Es handelt sich hierbei also um eine Unregelmäßigkeit, die aber durchaus positiv zu deuten ist, denn es wurden ca. 2.500 kWh erzeugt, welches im Jahr 2007 der höchste Wert war.

Der gesamte erzeugte Strom wird in das öffentliche Stromnetz zu einem festgelegten Vergütungssatz eingespeist, der Ertrag wird also komplett „verkauft“. Der auf dem Hof benötigte Strom wird ausschließlich dem öffentlichen Netz entnommen, allerdings ist der Preis pro kWh wesentlich geringer, als die Vergütung pro kWh bei der Einspeisung.

So sieht man leicht, dass eine Photovoltaik-Anlage sehr rentabel ist, da man – vor allem wenn man größere Mengen Strom erzeugt – einen nicht unerheblichen Gewinn machen kann. Nachteil einer solchen Anlage ist selbstverständlich der hohe Anschaffungspreis, welcher aber – wie man hier sieht – von mehreren unterstützenden Projekten erheblich geringer ausfallen kann als man denkt.

¹ Werte des Energieertrags aus einem Fachgespräch mit dem Betreiber am 12.02.2008

² 1 kWh entspricht der Energie, welche eine Maschine mit der Leistung 1 kW pro Stunde aufnimmt oder abgibt. Die Wattstunde bzw. Kilowattstunde ist eine Maßeinheit der Arbeit.

³ vgl. <http://www.energiesystem.de>

4. Anhang

4.1 Literaturverzeichnis

Hullmann, Heinz: Photovoltaik in Gebäuden – Handbuch für Architekten und Ingenieure, Hannover 1999

Fachgespräch mit J. Brunsiek (12. Februar 2008)

<http://www.brunsiek-doerentrup.de> (Zugriff mehrmals im Januar/Februar 2008)

<http://www.energiesystem.de> (Zugriff am 18. Januar 2008)

<http://de.wikipedia.org> (Geschichte der Photovoltaik, Zugriff am 6. Januar 2008)

4.2 Erklärung über selbstständige Erstellung der Facharbeit

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift