



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



370.007 FACHVERTIEFUNG ENERGIESYSTEME

SONNENEINSTRahlung UND PHOTOVOLTAIK TEIL 1

GRUPPE: D

DATUM: 10.05.2020

AUTOREN: TANJA MOSER 01526699

ANDREAS PATHA —!!—

TIM EDINGER —!!—

KONSTANTIN KOBEL 01525841

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
1.1	Aufgabe 1.1	3
1.2	Aufgabe 1.2	4
2	Berechnungen - Aufgabe 1.1	5
2.1	Beschreibung der Winkel	5
2.2	Berechnung des Moduleinfallswinkels Θ_{gen}	6
2.3	Berechnung der Strahlungsanteile auf eine geneigte Fläche	6
2.3.1	Direkte Strahlung	7
2.3.2	Diffuse Strahlung	7
2.3.3	Reflektierte Strahlung	7
2.4	Berechnung der gesamten Strahlung auf eine geneigte Fläche	8
2.5	Berechnung des Ertrags	8
3	Ergebnisse - Aufgabe 1.1	9
3.1	1.1.a	9
3.2	1.1.b	9
4	Ergebnisse - Aufgabe 1.2	9
4.1	1.2.a - Leistungsdauerlinie	9
4.2	1.2.b - monatliche Erträge	10
4.3	1.2.c - Ertragsminima und Ertragsmaxima	11
4.4	1.2.d - Strahlungsanteile	12
4.5	1.2.e - Durchschnittliche Stromproduktion	13
5	Interpretation der Ergebnisse	15
6	Literatur	15

1 Aufgabenstellung

1.1 Aufgabe 1.1

Aufgabe 1.1 befasst sich mit einer PV-Anlage mit folgenden Parametern:

- Der Standort ist Wien (48.2°N, 16.3°O).
- Die installierte Leistung ist $1kWp$.
- Der Neigungswinkel der PV-Anlage beträgt 20°.
- Der Azimut der Anlage ist 180° Süden.
- Der Modulwirkungsgrad η_{Modul} ist 0.17.
- Sonstige Verluste η_{sonst} (Reflexion, Temperatur, Wechselrichter, etc.) werden mit dem Wert 0.8 eingerechnet.
- Die Strahlungsdaten für den Standort sind in der Datei *Strahlung.mat* gegeben.
- Die Zeit in Viertelstunden-Werten ist in der Datei *time.mat* gegeben.
- Die Errechnung des Sonnenstandes erfolgt mit der in der Datei *SonnenstandTST.m* zur Verfügung gestellten Funktion *SonnenstandTST()*.

Zusätzlich werden folgende Annahmen getroffen:

- Standardtestbedingungen zur Bestimmung des Modulwirkungsgrades bzw. der Nennleistung P_{peak} (in W) bei 25° Modultemperatur.

$$P_{peak} = R_{STC} * A * \eta_{Modul} \quad (1)$$

- Vereinfachte Annahme für die Bestimmung des Ertrags der Anlage im Modell.

$$E_{ges} = G_{geneigt} * A * \eta_{Modul} * \eta_{sonst} \quad (2)$$

- Konstanter Wirkungsgrad.
- Erträge bei einem Höhenwinkel unter 5° werden vernachlässigt.
- Konstante Einstrahlung in den 15 Minuten Intervallen.
- Norden 5°, Osten 90°, Süden 180°, Westen 270°.

Die Aufgaben lauten:

- a) Erstellen Sie ein Modell, das für den gegebenen Sonnenstand und die Einstrahlungswerte (Diffus- und Direktstrahlung) auf eine horizontale Fläche den Ertrag der PV-Anlage nach Angabe der installierten Leistung in kW_{peak} und der Ausrichtung der Anlage (Azimut und Neigungswinkel) modelliert. Verwenden Sie dazu das isotrope Einstrahlungsmodell.
- b) Berechnen Sie mit Hilfe der Funktion aus a) den gesamten Jahresertrag 2005 und die Volllaststunden einer $1kW_p$ Anlage in Wien.

1.2 Aufgabe 1.2

Die Unterpunkte der Aufgabe 1.2 lauten:

- a) Erstellen Sie die Leistungsdauerlinie der PV-Erzeugung über das Jahr. Sortieren Sie dazu die erzeugte Leistung vom Maximum bis zum Minimum.
- b) Plotten Sie die monatlichen Erträge der PV-Erzeugung (12 Werte).
- c) Ermitteln Sie jeweils die 5 Tage mit der minimalen und der maximalen PV-Erzeugung. Geben Sie die Tage (Datum) und den energetischen Ertrag dieser Tage an.
- d) Stellen Sie in einem Diagramm die Anteile der Diffus-, Direkt- und der reflektierten Strahlung an jedem der 365 Tage dar (verwenden Sie dazu das File *plotStrahlungsanteile.m*).
- e) Berechnen Sie die durchschnittliche Stromproduktion für jede Stunde am Tag für die Monate Juni und Dezember. Erstellen Sie ein Diagramm mit Boxplots der Erzeugung für jede Stunde des Tages für die jeweiligen Monate.
 - Jeder Stundenwert besteht aus der Summe von vier Viertelstundenwerten.
 - Jeder Monat wird durch eine Matrix mit den Abmessungen *Stunden x Tage* dargestellt.
 - Der Input eines Boxplots ist eine Matrix.

2 Berechnungen - Aufgabe 1.1

2.1 Beschreibung der Winkel

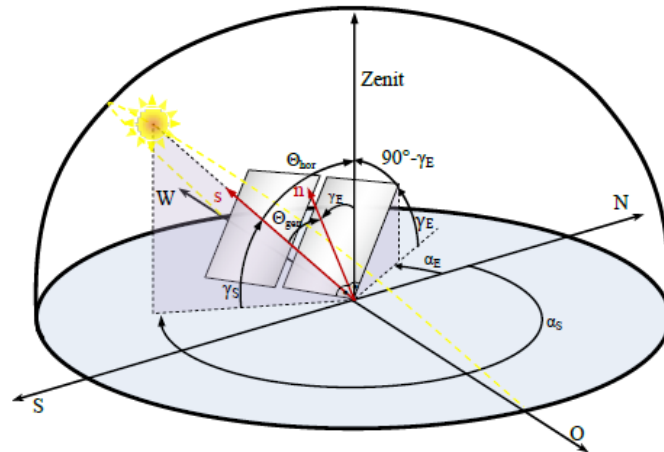


Abbildung 3.2.: Darstellung des Einfall- und Moduleinfallswinkel

Abbildung 1: Darstellung des Einfall- und Moduleinfallswinkel.

- α_S - **Sonnenazimut**. Der Sonnenazimut ist der Winkel zwischen der geographischen Nordrichtung und dem Vertikalkreis durch den Sonnenmittelpunkt. Er ist abhängig von der geographischen Breite des Standorts, der Jahreszeit und der Tageszeit.
- γ_S - **Sonnenhöhe**. Die Sonnenhöhe ist der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und der Horizontalebene vom Beobachter. Er ist ebenfalls abhängig von der geographischen Breite des Standorts, der Jahreszeit und der Tageszeit.
- α_E - **Modulazimut**. Der Modulazimut ist der Winkel der die Modulausrichtung gegenüber dem geographischen Nordpol angibt.
- γ_E - **Modulneigungswinkel**.
- Θ_{gen} - **Moduleinfallswinkel geneigt**. Der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf eine geneigte Fläche.
- Θ_{hor} - **Moduleinfallswinkel horizontal**. Der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung in horizontaler Richtung.
- *Zenit* - **Zenit**. Der Zenit steht normal auf den "Horizont".

2.2 Berechnung des Moduleinfallswinkels Θ_{gen}

Der Moduleinfallswinkel Θ_{gen} ist für die Berechnung der einzelnen Strahlungsanteile relevant. Er ist von der Südausrichtung des Moduls abhängig.

In unserem Fall beträgt die Südausrichtung 180° . Daraus folgt die Formel zur Berechnung des Moduleinfallswinkels zu

$$\Theta_{gen} = \arccos[-\cos(\gamma_S) * \sin(\gamma_E) * \cos(\alpha_S - \alpha_E - 180^\circ) + \sin(\gamma_S) * \cos(\gamma_E)] \quad (3)$$

Der MATLAB Code, zur Berechnung des Moduleinfallswinkels Θ_{gen} auf eine geneigte Fläche lautet wie folgt:

```
acosd(-cosd(sHoeckenwinkel).*sind(pvHoeckenwinkel)
.*cosd(sAzimut - pvAzimut - 180)+sind(
sHoeckenwinkel).*cosd(pvHoeckenwinkel));
```

In dieser Formel ist hervor zu heben, dass zur Berechnung jeweils die Funktionen sind, cosd und acosd genutzt wurden. Die Besonderheit liegt darin, dass diese Funktionen den Übergabeparameter in Grad erwarten, wohingegen sin, cos und acos den Winkel in Radiant erwarten.

In der Funktion werden folgende Variablen genutzt:

- **sAzimut** - Der Sonnenazimutalwinkel der Sonne. Dieser Wert wird mit Hilfe der Funktion SonnenstandTST berechnet.
- **sHoeckenwinkel** - Der Höhenwinkel der Sonne. Dieser Wert wird mit Hilfe der Funktion SonnenstandTST berechnet.
- **pvAzimut** - Der Azimutalwinkel der PV-Anlage. In unserem Fall entspricht α_E einem Winkel von 270° .
- **pvHoeckenwinkel** - Der Höhenwinkel der PV-Anlage. Dieser entspricht dem Modulneigungswinkel. In unserem Fall entspricht γ_E einem Winkel von 20° .

2.3 Berechnung der Strahlungsanteile auf eine geneigte Fläche

Im Falle einer geneigten PV-Anlage sind drei Strahlungsanteile relevant: direkte Strahlung, diffuse Strahlung und reflektierte Strahlung. (Im Falle einer horizontalen PV-Anlage würden sich die Strahlungsanteile auf die direkte und die diffuse Strahlung begrenzen, da die reflektierte Strahlung über $\frac{1-\cos(\gamma_E)}{2}$ vom Modulneigungswinkel abhängig ist. Im Falle eines Modulneigungswinkels ergibt sich somit für die reflektierte Strahlung ein Wert von 0.)

2.3.1 Direkte Strahlung

Die direkte Strahlung ist der Anteil, der direkt auf der PV-Anlage auftrifft. Die Berechnung des direkten Strahlungsanteils erfolgt über die Formel

$$E_{dir,gen} = E_{dir,hor} * \max(0, \frac{\cos \Theta_{gen}}{\sin \gamma_S}). \quad (4)$$

$E_{dir,hor}$ entspricht dabei der gemessenen Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche. Die Daten für $E_{dir,hor}$ sind in der Datei *Strahlung.mat* gegeben. Der MATLAB Code für die Berechnung lautet

```
DirectGen = Strahlung.DirectHoriz.*max(0, (cosd(
    pvModuleeinfallswinkel)./sind(sHoeckenwinkel)));
```

2.3.2 Diffuse Strahlung

Der diffuse Strahlungsanteil entspricht der Strahlung, die am Weg durch die Erdatmosphäre mit ihr wechselwirkt (z.B. mit Wolken). Die diffuse Strahlung kann als eine Hohlhalbkugel betrachtet werden, die sich über der PV-Anlage befindet und Licht emittiert. (Isotropes Diffusstrahlungsmodell)

Die Berechnung des diffusen Strahlungsanteils erfolgt über die Formel

$$E_{diff,gen,iso} = E_{diff,hor} * \frac{1 + \cos(\gamma_E)}{2}. \quad (5)$$

Daraus ergibt sich folgender MATLAB Code:

```
DiffusGen = Strahlung.DiffusHoriz.*(1+cosd(
    pvHoeckenwinkel))./2;
```

2.3.3 Reflektierte Strahlung

Bei der reflektierten Strahlung handelt es sich um den Strahlungsanteil, der zuerst vom Boden reflektiert wird und dann auf dem PV Modul auftrifft.

Daraus folgt die Formel zur Berechnung des reflektierten Strahlungsanteils zu

$$E_{refl,gen} = E_{G,hor} * A * \frac{1 - \cos(\gamma_E)}{2}. \quad (6)$$

A entspricht in dieser Formel dem Albedo-Wert. Dieser entspricht dem Verhältnis der auf eine Fläche einfallenden Strahlung und der von der Fläche reflektierten Strahlung. Ist dieser Wert für eine Fläche nicht bekannt, kann er mit dem Wert 0.2 angenommen werden.

Der daraus resultierende MATLAB Code, zur Errechnung der reflektierten Strahlung, lautet

$$\text{ReflectedGen} = \text{Strahlung} . \text{Reflected} . * 0.2 . * (1 - \cos(\text{pvHoeihenwinkel})) ./ 2;$$

2.4 Berechnung der gesamten Strahlung auf eine geneigte Fläche

Wie bereits eingangs erwähnt, setzt sich die gesamte Strahlung auf eine geneigte Fläche aus dem direkten, dem diffusen und dem reflektierten Strahlungsanteil zusammen.

Daraus ergibt sich

$$E_{G,gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen,iso} + E_{refl,gen}. \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung des obigen MATLAB Codes ergibt sich für die Berechnung der gesamten Strahlung auf eine geneigte Fläche

$$\text{GesGen} = \text{DirectGen} + \text{ReflectedGen} + \text{DiffusGen};$$

Als zusätzliche Annahme wurde definiert, dass Erträge bei einem Höhenwinkel unter 5° nicht berücksichtigt werden sollen.

Diese Annahme lässt sich durch folgende Formel umsetzen:

$$\text{GesGen}(\text{sHoeihenwinkel} < 5) = 0;$$

2.5 Berechnung des Ertrags

Der gesamte Ertrag E_{ges} der Anlage errechnet sich durch

$$E = E_{G,gen} * A * \eta_{Modul} * \eta_{sonst}. \quad (8)$$

- $E_{G,gen}$ entspricht der gesamten Einstrahlung (dem gesamten Ertrag) auf die geneigte PV-Anlage.
- A entspricht der Fläche der PV-Anlage.
- η_{Modul} ist der Modulwirkungsgrad (in unserem Fall 0.17).
- η_{sonst} sind sonstige Verluste, die durch Reflexion, die Temperatur, Wechselrichter, etc. auftreten. (In unserem Fall 0.8).

Da die in der Variable $E_{G,gen}$ errechneten Werte in 15 Minuten Intervalle aufgeteilt sind, müssen wir in MATLAB eine zusätzliche Korrektur (ein Multiplikator mit dem Wert 0.25) in die Formel einfügen:

$$\text{Eges} = \text{GesGen} . * 0.25 . * \text{pvFlaeche} . * \text{pvWirkungsgrad} . * \text{pvVerluste};$$

3 Ergebnisse - Aufgabe 1.1

3.1 1.1.a

In Aufgabe 1.1.a ging es darum ein Modell zu erstellen, das für eine bestimmte Anlage (mit gegebenem Sonnenstand und Einstrahlungswerten) den Ertrag der PV-Anlage errechnet.

Das Modell zur Berechnung des Ertrags befindet sich in der Datei *Beispiel1.m*. Die Ergebnisse der Berechnungen werden im Unterpunkt 1.1.b beschrieben.

3.2 1.1.b

In Aufgabe 1.1.b waren der gesamte Jahresertrag 2005 und die Volllaststunden, der in der Angabe parametrisierten Anlage, zu errechnen.

Die Ergebnisse der Berechnungen befinden sich in den Dateien *Jahresertrag_2005.mat* beziehungsweise *Vollaststunden.mat*.

Durch Aufsummieren der einzelnen Viertelstunden-Erträge, erhält man für das Jahr 2005 einen Gesamtertrag von $219.25kWh$.

Über die Formel

$$T = \frac{\sum_{t=1}^T P_t}{P_{Peak}} \quad (9)$$

können die Volllaststunden der Anlage errechnet werden. Im Falle unserer $1kWp$ Anlage ergibt sich eine Volllast von etwa 219.25 Stunden.

4 Ergebnisse - Aufgabe 1.2

4.1 1.2.a - Leistungsdauerlinie

Das Ziel der Aufgabe 1.2.a war eine Leistungsdauerlinie der PV-Erzeugung, über das Jahr, darzustellen.

Eine Leistungsdauerlinie gibt die erbrachte Leistung der PV-Anlage, über eine bestimmte Zeitspanne, an.

Die Leistung P der Anlage ergibt sich aus

$$P = E * 15 \quad (10)$$

Die Multiplikation mit 15 ist nötig, da die Energie der Anlage mit $Wh/15min$ gegeben ist.

Um aus dem berechneten gesamten Ertrag der PV-Anlage die Leistungsdauerlinie zu erhalten, ist folgender MATLAB Code notwendig:

```
sort(Eges, 'descend').*15;
```

Daraus ergibt sich folgendes Diagramm:

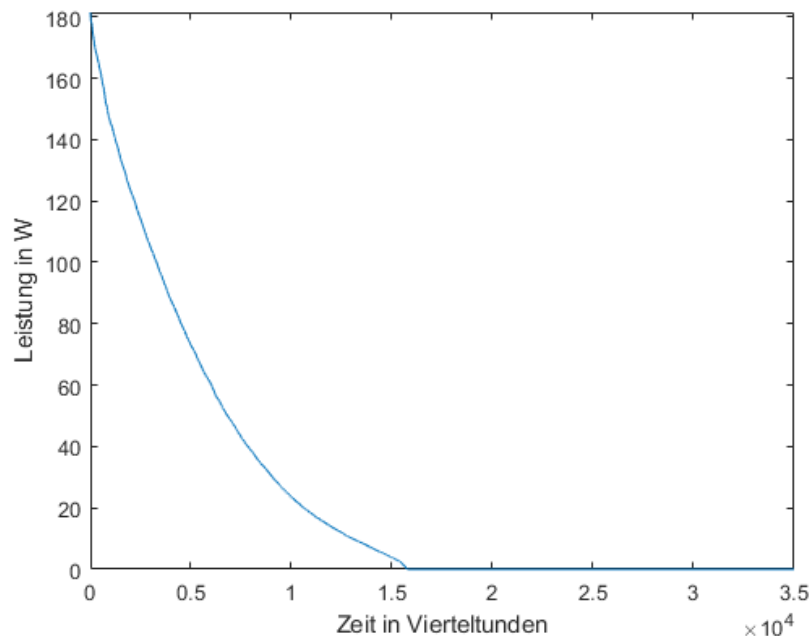


Abbildung 2: Leistungsdauerlinie der PV-Anlage, im Jahre 2005. (x-Achse in Viertelstunden-Schritten)

In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die PV-Anlage in einem Zeitraum von ungefähr 5.2 Monaten (~ 16.000 Viertelstunden) Energie liefert. Der Grund, warum die Anlage die restlichen 6.8 Monate keine Energie liefert, ist einerseits die Nacht. Andererseits ist die Anlage nicht nachgeführt, was zu einem geringeren Ertrag in den Morgen- und Abendstunden führt.

4.2 1.2.b - monatliche Erträge

In Aufgabe 1.2.b ging es darum einen Plot über die monatlichen Erträge der PV-Anlage zu erstellen.

Der Plot kann mit folgendem MATLAB Code erstellt werden:

```
plot(Eges);
```

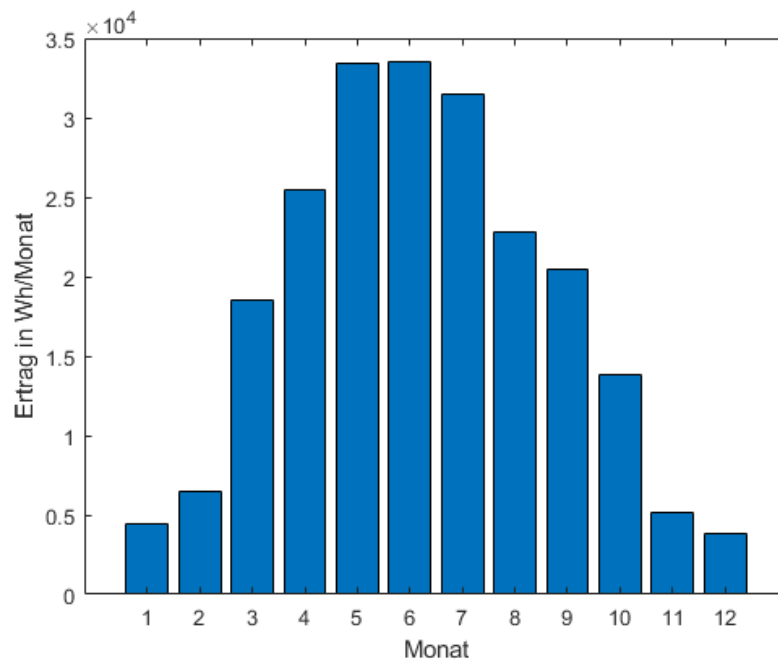


Abbildung 3: Monatliche Erträge der PV-Anlage, über das Jahr 2005.

In Abbildung 3 ist schön dargestellt, wie der Ertrag der PV-Anlage in den Sommermonaten deutlich höher ist, als in den Wintermonaten.

Das ist dadurch begründet, dass in den Sommermonaten die Strahlungsleistung auf einen Quadratmeter deutlich höher ist und die Tage zusätzlich länger sind, als in den Wintermonaten.

Da wir in der Angabe definiert haben, dass der Wirkungsgrad der PV-Anlage konstant ist, wurde der Faktor "Temperatur" nicht in der Berechnung berücksichtigt.

Dieser würde jedoch dafür sorgen, dass der Wirkungsgrad bei höheren Temperaturen sinkt und bei niedrigeren Temperaturen steigt.

4.3 1.2.c - Ertragsminima und Ertragsmaxima

Das Ziel von Aufgabe 1.2.c war es jeweils die fünf ertragreichsten und ertragsschwächsten Tage zu identifizieren.

Hierzu müssen die Viertelstunden-Erträge in der Variable *Eges* zuerst zu ganzen Tagen aufsummiert werden.

Dies geschieht über folgenden Code:

```
Etag = zeros(1,365);
for tag=1:365
    Etag(tag) = sum(Eges(time.Tag == tag));
```

end

Um nun die fünf ertragsstärksten bzw. ertragsschwächsten Tage zu ermitteln, können die Funktionen $\text{maxk}(Etag, 5)$ bzw. $\text{mink}(Etag, 5)$ benutzt werden.

Daraus ergeben sich für die ertragsstärksten Tage:

Tagesertrag (in Wh)	1.5104e+03	1.5079e+03	1.4992e+03	1.4989e+03	1.48783+03
Datum	21-Jun-2005	24-Jun-2005	23-Jun-2005	03-Jun-2005	04-Jul-2005

Die ertragsschwächsten Tage sind:

Tagesertrag (in Wh)	52.7921	54.5420	58.0446	59.8388	60.2442
Datum	06-Dec-2005	31-Dec-2005	27-Nov-2005	03-Dec-2005	28-Dec-2005

Die ertragsstärksten Tage liegen, wie erwartet, in den Sommermonaten (in diesem Fall alle im Juni), während die ertragsschwächsten Tage in den Wintermonaten (in unserem Fall Dezember) liegen.

Die PV-Anlage produziert maximal $1.5104e + 03Wh$ und minimal $52.7921Wh$. Die Verteilung über jeweils einen Tag ist glockenförmig, mit einem Maximum bei circa 12:00 Uhr.

4.4 1.2.d - Strahlungsanteile

Zur Darstellung der Strahlungsanteile in einem Diagramm, steht uns die Funktion $\text{plotStrahlungsanteile}$ zur Verfügung.

Damit ergibt sich folgender MATLAB Code:

```
plotStrahlungsanteile(pvAzimut, pvHoeckenwinkel,
    sLaengengrad, sBreitengrad, Strahlung, time)
```

Das resultierende Diagramm ist in Abbildung 4 dargestellt.

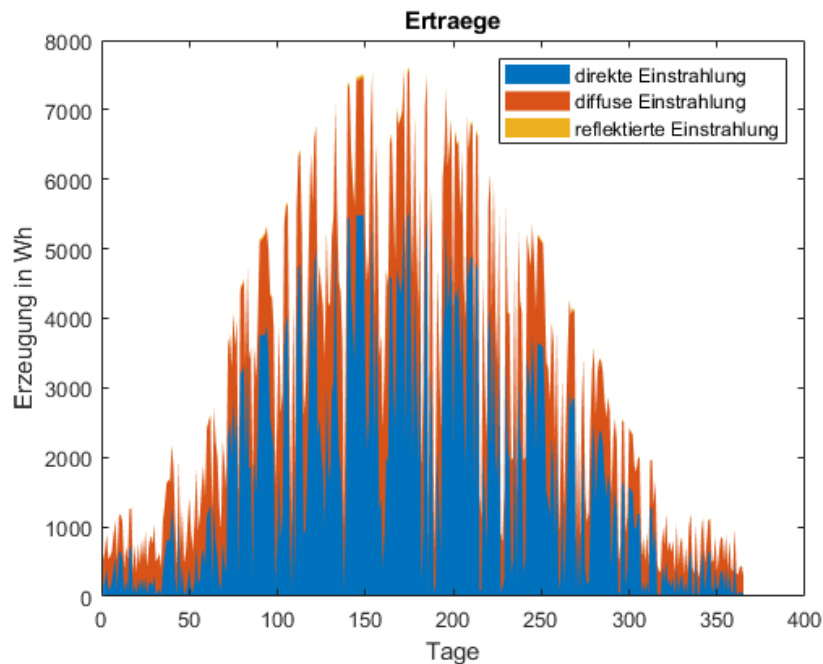


Abbildung 4: Strahlungsanteile, über das Jahr 2005.

Wie erwartet kommt der Großteil der Strahlungsenergie von der direkten und der diffusen Strahlung. Der reflektierte Anteil trägt relativ wenig zur Energie bei.

4.5 1.2.e - Durchschnittliche Stromproduktion

In Aufgabe 1.2.e sollte die durchschnittliche Stromproduktion für jede Stunde am Tag, für die Monate Juni und Dezember, berechnet werden. Die Darstellung soll mithilfe von Boxplots geschehen.

Mithilfe folgendem MATLAB Code erhalten wir eine 24×30 Matrix, die uns zu jedem Tag des Monats Juni den Ertrag in *Wh* angibt:

```
Ejuni = Eges(time.Monat == 6);
EJuniStunden = sum(reshape(Ejuni,4,720));
EJuniTage = reshape(EJuniStunden,24,30);
```

Analog dazu kann die Matrix für Dezember folgendermaßen errechnet werden:

```
Edezember = Eges(time.Monat == 12);
EDEzemberStunden = sum(reshape(Edezember,4,744));
EDEzemberTage = reshape(EDEzemberStunden,24,31);
```

Die resultierenden Boxplot Diagramme sehen folgendermaßen aus:

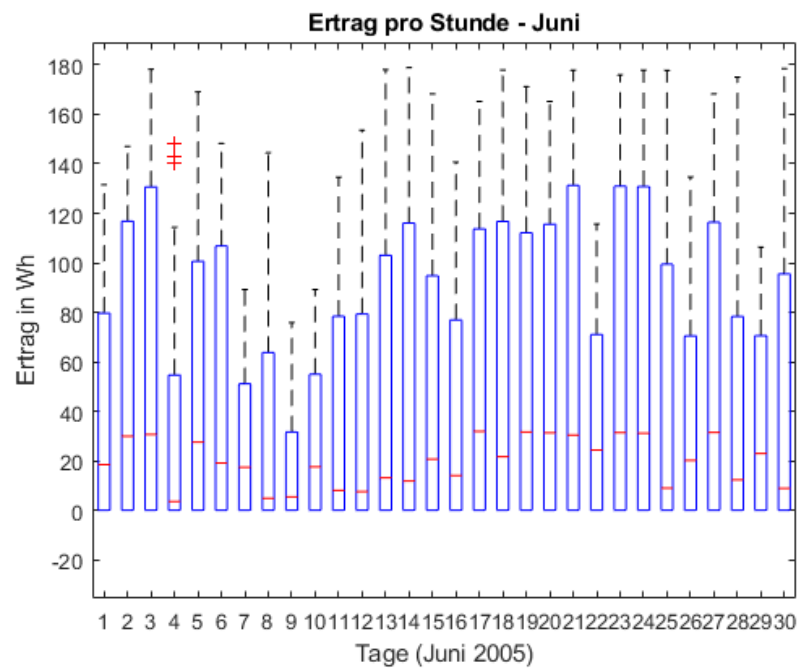


Abbildung 5: Ertrag pro Stunde, über das Monat Juni 2005.

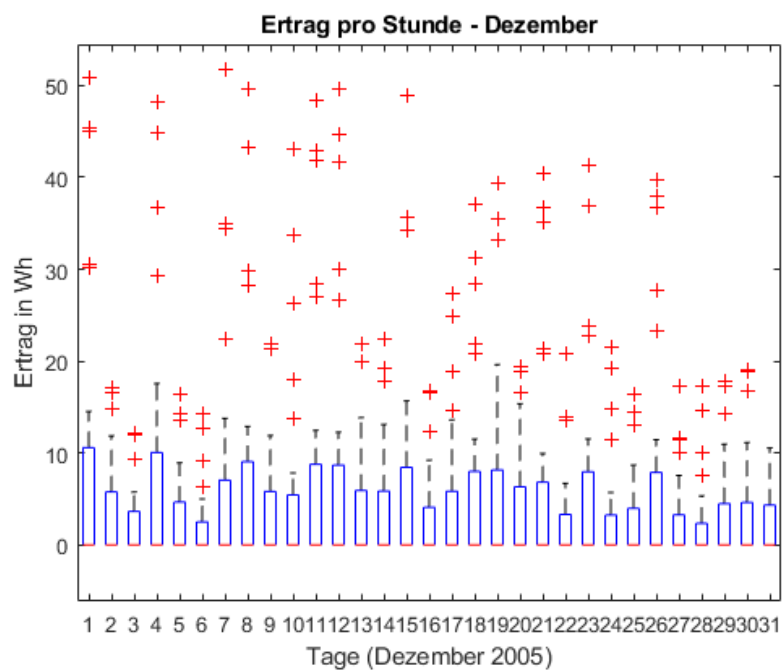


Abbildung 6: Ertrag pro Stunde, über das Monat Dezember 2005.

5 Interpretation der Ergebnisse

Die errechneten Werte basieren auf Annahmen, die unter Anderem einen, durch die Temperatur veränderten, Wirkungsgrad der PV-Anlage, Verschattung durch Bäume und Gebäude und Verschmutzung nicht berücksichtigen. Sie vermitteln daher eine ungefähre Idee über den Ertrag der Anlage, sollten jedoch nur in Anbetracht dieser Annahmen weiterverwendet werden.

6 Literatur

Modellierung eines Wärmeschichtspeichers mit Solareinbindung in Excel/VBA von Rainer Blabensteiner.