



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



370.007 FACHVERTIEFUNG ENERGIESYSTEME

SONNENEINSTRahlung UND PHOTOVOLTAIK TEIL 2

GRUPPE: D

DATUM: 13.05.2020

AUTOREN: TANJA MOSER 01526699

ANDREAS PATHA 01609934

TIM EDINGER 01525912

KONSTANTIN KOBEL 01525841

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
1.1	Aufgabe 2.1	3
1.2	Aufgabe 2.2	3
1.3	Aufgabe 2.3	4
2	Berechnungen	5
2.1	Temperaturabhängigkeit einer PV-Anlage	5
3	Ergebnisse - Aufgabe 2.1	7
3.1	2.1.a	7
3.2	2.1.b	7
4	Ergebnisse - Aufgabe 2.2	10
4.1	2.2.a	10
4.2	2.2.b	10
4.3	2.2.c	13
5	Ergebnisse - Aufgabe 2.3	15
5.1	2.3.a	15
5.2	2.3.b	16
5.3	2.3.c	18
6	Literatur	19

1 Aufgabenstellung

1.1 Aufgabe 2.1

Aufgabe 2.1 befasst sich mit einer PV-Anlage der ersten Übung, unter Einfluss der Temperatur und Einstrahlung mit folgenden Parametern:

- Sonstige Verluste η_{sonst} (Reflexion, Temperatur, Wechselrichter, etc.) werden mit dem Wert 0.8 eingerechnet.
- Der Modulwirkungsgrad η_{Modul} ist 0.17.
- Silizium-Zelle: Koeffizienten $kx, x = 1, \dots, 6$ (Huld et al.-Table1 -S.329)
- Die Errechnung des Sonnenstandes erfolgt mit der in der Datei *SonnenstandTST.m* (zur Verfügung gestellten Funktion *SonnenstandTST()*)
- Die Strahlungsdaten für den Standort sind in der Datei *Strahlung.mat* gegeben.
- Die Daten zur Temperatur sind in der Datei *Temperatur.mat* gegeben.

Die Aufgaben lauten:

- a) Erweitern Sie das Modell, um die Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur und der Einstrahlung auf den Wirkungsgrad des PV-Moduls (erweitern Sie Ihre Funktion aus Aufgabe 1.1).
- b) Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit jenen aus Aufgabe 1. Wie verändert sich die Verteilung der Erzeugung über die Jahreszeiten und innerhalb des Tages im Vergleich zum vereinfachten Ansatz ohne Berücksichtigung von Temperatur- und Strahlungseinfluss auf den Wirkungsgrad? Stellen Sie dazu die monatlichen Erträge gegenüber sowie die durchschnittlichen stündlichen Werte.

1.2 Aufgabe 2.2

Die Unterpunkte der Aufgabe 2.2 lauten:

- a) Berechnen Sie die Erzeugung einer 1 kW_{peak} Anlage (in Wien) unter Abhängigkeit des Aufstellwinkels (mit Temperatureinfluss). Variieren Sie den Neigungswinkel der Anlage von 0 bis 90 in 2.5-Intervallen und den Azimut der Anlage von 0 bis 360 in 10-Schritten.
- b) Stellen Sie die Volllaststunden der Anlage in Abhängigkeit der Aufstellwinkel in einer 3D-Grafik dar. Verwenden Sie dazu einmal die Plot-Funktion *meshc* und einmal *contour*, um ISO-Ertragslinien darzustellen.

- Bei welcher Winkelkombination erhalten Sie den höchsten Ertrag?
 - Zeichnen Sie diesen Punkt in den beiden Darstellungen ein!
- c) Wiederholen Sie die 3D-Berechnung und Darstellung einmal für den Monat Juni und einmal für Dezember.
- Was beobachten Sie?
 - Welche Winkelkombinationen würden Sie für die diese beiden Monate empfehlen?

1.3 Aufgabe 2.3

Vergleichen Sie die Erzeugung einer 1 kW_{peak} Anlage von 2 zusätzlichen (möglichst unterschiedlichen) Standorten in Europa mit der von Wien. Die Strahlungs- und Temperaturdaten sind für das Jahr 2005 auf <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free> verfügbar.

- a) Vergleichen Sie die Erzeugung der Standorte und zeigen Sie die wesentlichen Unterschiede zwischen den Standorten:
- gesamte Jahreserzeugung und Volllaststunden
 - durchschnittliche Tagesproduktion (24 Werte pro Standort)
- b) Stellen Sie die Volllaststunden der Anlagen in Abhängigkeit der Aufstellwinkel in einer Grafik dar. Welche Unterschiede erkennen Sie? Wo liegen jeweils die optimalen Winkelkombinationen für jeden Standort?
- c) Beschreiben Sie die Gründe, warum die Erzeugung aus PV-Anlagen an unterschiedlichen Standorten zeitliche (tageszeitliche und saisonale) Unterschiede aufweist.

2 Berechnungen

2.1 Temperaturabhängigkeit einer PV-Anlage

Wie bereits in Kapitel 5 "Interpretation der Ergebnisse" von Protokoll 1 erwähnt, ist der Wirkungsgrad einer PV-Anlage von der Temperatur dieser abhängig. Generell gilt, dass der Wirkungsgrad bei niedrigen Temperaturen steigt und bei hohen Temperaturen sinkt. Der temperaturabhängige Wirkungsgrad kann über folgende Formel ermittelt werden:

$$\eta_{rel} = 1 + k_1 * \ln(G') + k_2 * \ln(G')^2 + T' * (k_3 + k_4 * \ln(G') + k_5 * \ln(G')^2) + k_6 * T'^2 \quad (1)$$

Die Parameter in dieser Gleichung sind folgendermaßen definiert:

- G - Dieser Wert entspricht der gesamten, auf die PV-Anlage auftreffenden, Einstrahlung. (Die Berechnung von G wird im ersten Protokoll erklärt.)
- T_{modSTC} - Dieser Wert wurde als Referenzwert, für die Temperatur des Moduls, in den Standard Test Conditions definiert. Er entspricht $25^\circ C$.
- G_{STC} - Dieser Wert wurde in den Standard Test Conditions als Referenzwert für die einfallende Strahlung definiert. Er entspricht $1000W/m^2$.
- c_T - Dieser Faktor gibt an, wie stark sich das Modul durch Sonneneinstrahlung erhitzt.
- T_{amb} - Entspricht der Umgebungstemperatur der PV-Anlage.
- T_{mod} - Entspricht der tatsächlichen Temperatur des Moduls. Diese errechnet sich zu $T_{mod} = T_{amb} + c_T * G$.
- G' - Dieser Wert ist der Quotient aus der tatsächlichen Einstrahlung G und der in den Standard Test Conditions definierten Einstrahlung G_{STC} . Daraus ergibt sich $G' = \frac{G}{G_{STC}}$.
- T' - Die Temperatur des Moduls wird als Differenz zum Referenzwert T_{modSTC} angegeben. Diese errechnet sich zu $T' = T_{mod} - T_{modSTC}$.

Die Parameter k_1 bis k_6 , für c-Si Module, müssen durch Messungen gefunden werden. Sie werden im Skript *MappingtheperformanceofPVmodules, effectsofmoduletypeanddataaveraging* folgendermaßen definiert:

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
-0.017162	-0.040289	-0.004681	0.000148	0.000169	0.000005

In MATLAB ergibt sich daraus folgender Code:

```

Tmod = repelem(Temperatur,4) + ct.*GesGen;
T = Tmod - TmodSTC;
TWirkungsgrad=1+k1.*log(G)+k2.*pow2(log(G))+T.*(k3+k4.*
    log(G)+k5.*pow2(log(G)))+k6.*pow2(T);

```

Da die Temperatur in der Datei *Temperatur.mat* nur in Stunden-Intervallen gegeben ist, müssen wir den Array der Temperatur dementsprechend skalieren, damit eine Multiplikation mit *GesGen* möglich ist. (*GesGen* enthält Viertelstunden-Werte)

Die Berechnung von *GesGen* wird im ersten Protokoll erklärt.

Daraus ergibt sich die temperaturabhängige Energie zu

$$E = E_{G,gen} * A * \eta_{Modul} * \eta_{sonst} * \eta_{rel} \quad (2)$$

Definitionen zu Formel (2) können dem ersten Protokoll entnommen werden.

3 Ergebnisse - Aufgabe 2.1

3.1 2.1.a

In Aufgabe 2.1.a ging es darum das Modell aus Aufgabe 1.1.a, aus dem ersten Protokoll, so zu erweitern, dass die Temperaturabhängigkeit der PV-Anlage in den Berechnungen berücksichtigt wird.

Das Modell zur Berechnung des temperaturabhängigen Ertrags befindet sich in der Datei *Beispiel2.m* bzw. in *Jahreserzeugung.m*. Die Ergebnisse der Berechnungen werden im Unterpunkt 2.1.b beschrieben.

3.2 2.1.b

In Aufgabe 2.1.b ging es darum zu demonstrieren, wie sich die Verteilung der Erzeugung über die Jahreszeiten und innerhalb des Tages verändert, wenn die Temperaturabhängigkeit der PV-Anlage in den Berechnungen berücksichtigt wird.

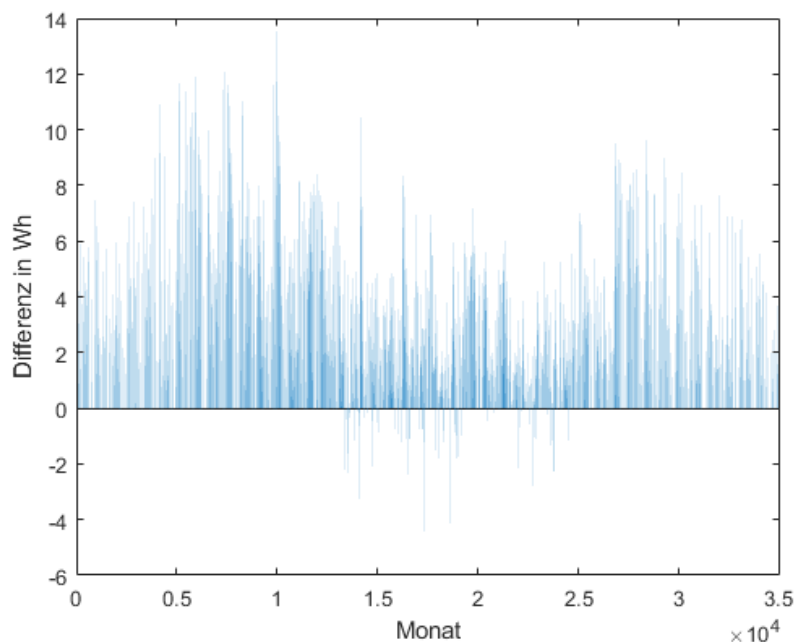


Abbildung 1: Differenz zwischen dem idealen und dem temperaturabhängigen Ertrag, über das Jahr 2005. (in Viertelstunden-Intervallen)

In Abbildung 1 ist die Differenz zwischen dem idealen und dem temperaturabhängigen Ertrag dargestellt. Für jeden Viertelstunden-Wert des Jahres 2005 wurde die Differenz

errechnet und dann in einem Balkendiagramm dargestellt.
In MATLAB wurde das Diagramm mit folgendem Code erstellt:

```
bar(EgesT-Eges)
```

E_{ges} entspricht dem idealen und E_{gesT} dem temperaturabhängigen Ertrag.

Im Diagramm ist zu erkennen, dass der temperaturabhängige Ertrag in den Monaten von Jänner bis Mai, sowie von Oktober bis Dezember, deutlich höher ist, als der ideale Ertrag. Der Grund dafür ist der erhöhte Wirkungsgrad der PV-Anlage bei niedrigeren Temperaturen.

In den Sommer-Monaten, von Juni bis September, ist die Temperatur hoch, woraus ein niedrigerer Wirkungsgrad der PV-Anlage resultiert. Das hat wiederum zur Folge, dass in diesen Monaten das temperaturabhängige Modell vereinzelt einen niedrigeren Ertrag liefert, als die ideale Berechnung.

Zur besseren Darstellung der Veränderung sollten in Aufgabe 2.1.b zusätzlich die monatlichen Erträge sowie die durchschnittlichen stündlichen Werte gegenüber gestellt werden.

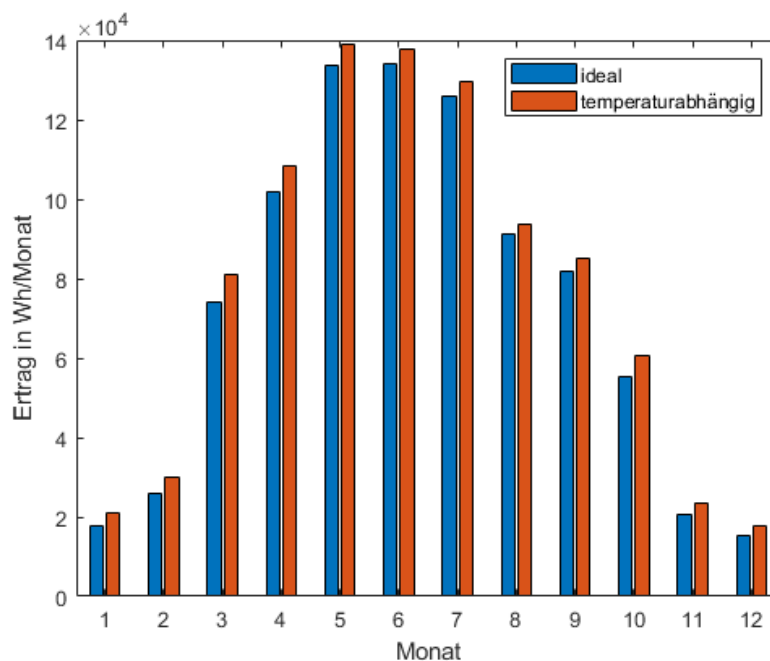


Abbildung 2: Vergleich der monatlichen Erträge der idealen und der temperaturunabhängigen Berechnung.

In Abbildung 2 werden die monatlichen Erträge der jeweiligen Modelle verglichen.

Über das gesamte Jahr 2005 hinweg liefert das temperaturabhängige Modell einen höheren Ertrag.

In den Monaten März, April und Oktober ist die Differenz zwischen dem temperaturabhängigen und dem temperaturunabhängigen Modell am größten. Der Grund dafür ist, dass es in diesen Zeiträumen relativ kalt ist, es gleichzeitig aber mehr Einstrahlung auf die PV-Anlage gibt, als zum Beispiel in den Monaten Dezember und Jänner.

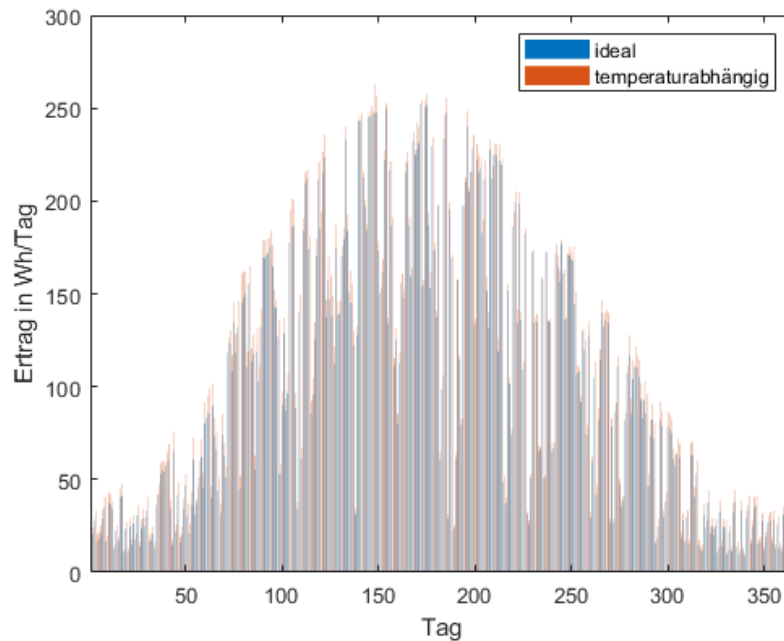


Abbildung 3: Vergleich der durchschnittlichen stündlichen Erträge, pro Tag, der idealen und der temperaturunabhängigen Berechnung.

In Abbildung 3 wird der durchschnittliche stündliche Ertrag, pro Tag, des idealen und des temperaturabhängigen Modells, dargestellt. Auch in diesem Diagramm ist ersichtlich, dass der durchschnittliche stündliche Ertrag bei dem temperaturabhängigen Modell die meiste Zeit höher ist, als beim idealen Modell. Lediglich in den Sommer-Monaten von Juni bis September gibt es vereinzelt Tage, an denen das ideale Modell einen höheren Ertrag als Ergebnis hat.

4 Ergebnisse - Aufgabe 2.2

In Aufgabe 2.2. sollte die Erzeugung einer PV-Anlage, mit Standort Wien, unter Abhängigkeit des Aufstellwinkels dargestellt werden. Dazu soll der Neigungswinkel der Anlage von 0° bis 90° in 2.5° -Intervallen und der Azimut der Anlage von 0° bis 360° in 10° -Intervallen verändert werden.

Zur Berechnung soll der temperaturabhängige Ertrag verwendet werden.

4.1 2.2.a

Das Ziel von Aufgabe 2.1.a ist es der PV-Anlage in Abhängigkeit der Aufstellwinkel zu errechnen.

Hierzu wurden in MATLAB zwei Vektoren definiert:

- **pvHoeckenwinkelNeu** = 0 : 2.5 : 90.
- **pvAzimutNeu** = 0 : 10 : 360

Mithilfe von zwei for-Schleifen kann für jede Kombination aus Azimut und Neigungswinkel der resultierende Ertrag errechnet werden.

```

for h=1:length(pvHoeckenwinkelNeu)
    for a=1:length(pvAzimutNeu)
        pvModuleinfallswinkelNeu = acosd(-cosd(
            sHoeckenwinkel).*sind(
                pvHoeckenwinkelNeu(h)).*cosd(sAzimut -
                    pvAzimutNeu(a)-180)+sind(
                        sHoeckenwinkel).*cosd(
                            pvHoeckenwinkelNeu(h)));
        [~,Eges3T] = Jahreserzeugung(
            pvHoeckenwinkelNeu(h), pvGroesse,
            pvWirkungsgrad, pvVerluste,
            pvModuleinfallswinkelNeu,
            sHoeckenwinkel, Strahlung, gSTC,
            TmodSTC, ct, Temperatur);
    end
end

```

4.2 2.2.b

In Aufgabe 2.2.b sollen aus dem in Aufgabe 2.2.a errechneten Ertrag, die Volllaststunden errechnet werden.

Die Volllaststunden können über die Formel

$$T = \frac{\sum_{t=1}^T P_t}{P_{Peak}} \quad (3)$$

errechnet werden.

Der MATLAB Code aus Aufgabe 2.2.a wird daher um die Berechnung der Volllaststunden erweitert.

```

for h=1:length(pvHoeckenwinkelNeu)
    for a=1:length(pvAzimutNeu)
        pvModuleinfallswinkelNeu = acosd(-cosd(
            sHoeckenwinkel).*sind(
                pvHoeckenwinkelNeu(h)).*cosd(sAzimut-
                pvAzimutNeu(a)-180)+sind(
                    sHoeckenwinkel).*cosd(
                        pvHoeckenwinkelNeu(h)));
        [~,Eges3T] = Jahreserzeugung(
            pvHoeckenwinkelNeu(h), pvGroesse,
            pvWirkungsgrad, pvVerluste,
            pvModuleinfallswinkelNeu,
            sHoeckenwinkel, Strahlung, gSTC,
            TmodSTC, ct, Temperatur);
        combinations(h,a) = sum(Eges3T)/(
            pvGroesse.*1000);
    end
end

```

Das Ergebnis ist eine 37 x 37 Matrix, in der für jede Kombination aus Azimut und Neigungswinkel der PV-Anlage die Anzahl der Volllaststunden gespeichert ist.

Mit der Funktion *meshc* kann aus dieser Matrix eine dreidimensionale Darstellung erstellt werden.

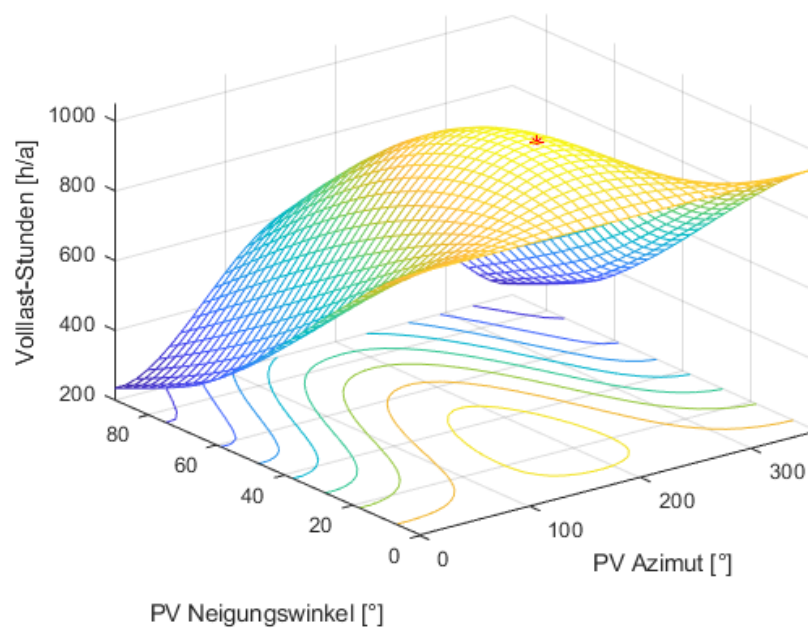


Abbildung 4: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage.

Mit Hilfe der Funktion *contour* kann eine zweidimensionale Darstellung der selben Daten erstellt werden.

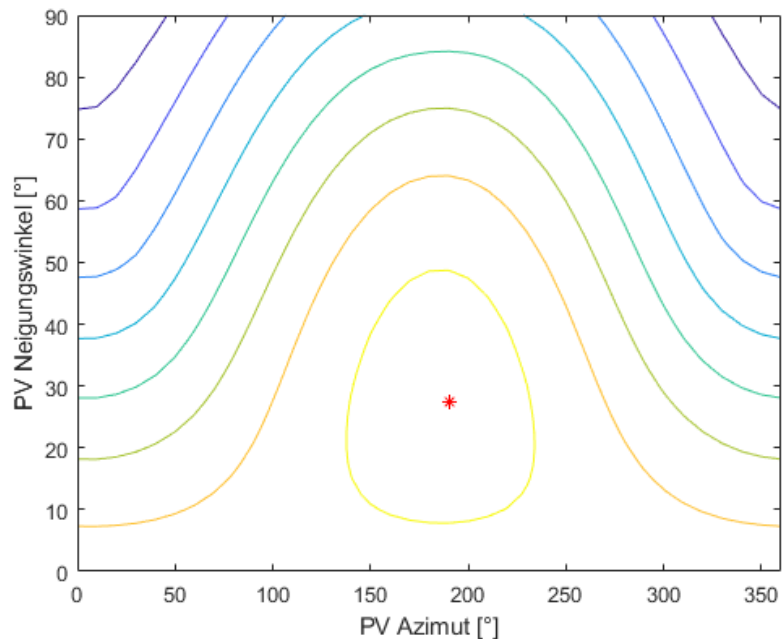


Abbildung 5: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage.

Die maximale Anzahl an Volllaststunden (= der maximale Ertrag) wird bei einem Neigungswinkel von 27.5° und einem Azimut von 190° erreicht. Sie beträgt 248.5021 Stunden. Dieser Wert wird in den Abbildungen 4 und 5 als roter Punkt dargestellt.

4.3 2.2.c

In Aufgabe 2.2.c soll die Berechnung aus Aufgabe 2.2.b spezifisch für die Monate Juni und Dezember durchgeführt werden.

Die Berechnung, sowie der MATLAB Code, kann der Beschreibung von Aufgabe 2.2.b entnommen werden.

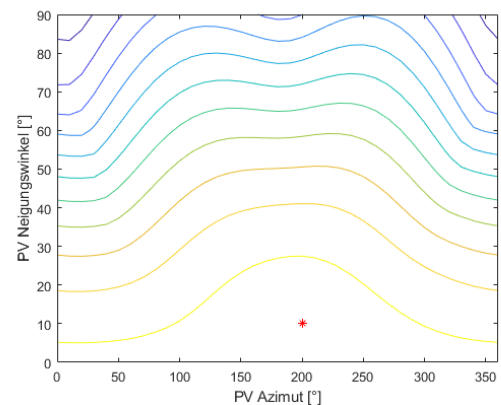
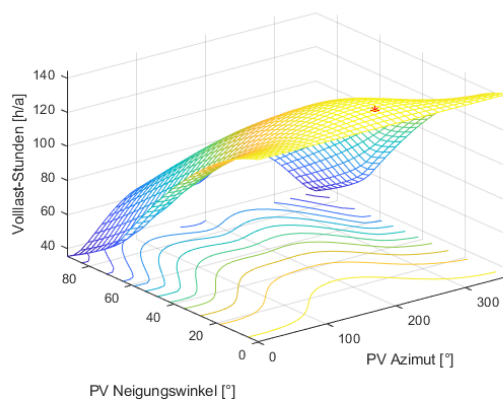


Abbildung 6: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage, für das Monat Juni.

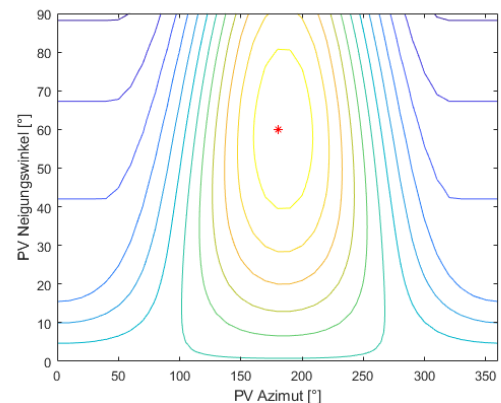
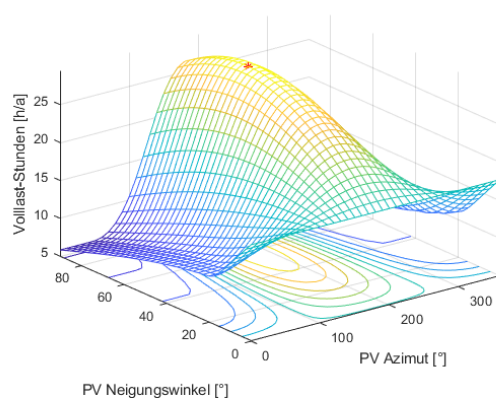


Abbildung 7: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage, für das Monat Dezember.

In den Abbildungen 6 und 7 werden die Volllaststunden, bei veränderten Aufstellwinkeln der PV-Anlage, dargestellt. Der jeweils maximale Ertrag wird durch einen roten Punkt gekennzeichnet.

Die optimalen Aufstellwinkel lauten:

	Azmiut	Neigungswinkel	Kommentar
Juni	200°	12.5°	Die Sonne steht im Juni zur Mittagszeit fast senkrecht auf den Horizont =>flacher optimaler Neigungswinkel der Anlage
Dezember	180°	60°	Der Sonnenweg ist im Dezember sehr flach =>steiler optimaler Neigungswinkel der Anlage

5 Ergebnisse - Aufgabe 2.3

Zusätzlich zu den Aufstellwinkeln der PV-Anlage ist der Standort dieser maßgeblich entscheidend für den Ertrag.

In Aufgabe 2.3 sollten zusätzlich zu der PV-Anlage in Wien zwei weitere Standorte in Europa ausgewählt werden.

Die zusätzlichen zwei Standorte sind in unserem Fall:

	Längengrad	Breitengrad
Neapel	14.24878°	40.83593°
London	-0.12765°	51.50732°

5.1 2.3.a

In Aufgabe 2.3.a sollten die drei Standorte verglichen werden. Der Vergleich erfolgt aufgrund der gesamten Jahreserzeugung, der Volllaststunden und der durchschnittlichen Tagesproduktion.

Für die folgenden Berechnungen ist der Azimut für alle Standorte 270° und der Neigungswinkel 20°. Die Temperatur wird in den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt, da für uns für die Standorte Neapel und London keine validen Temperaturdaten verfügbar sind.

Die gesamte Jahresproduktion, sowie die Volllaststunden der drei Standorte, werden in folgender Tabelle dargestellt.

	Gesamte Jahresproduktion (in Wh)	Volllaststunden
Wien	$2.1925e + 05$	219.2469
Neapel	$1.3696e + 06$	1369.6
London	$8.2662e + 05$	826.6216

Die gesamte Jahresproduktion und somit auch die Anzahl der Volllaststunden, ist in Neapel am höchsten. Da Neapel der südlichste der drei Standorte ist, war dies zu erwarten. Zusätzlich wird die Temperatur in der Berechnung nicht berücksichtigt, was den Ertrag in Neapel noch höher wirken lässt. In der Realität müsste man natürlich die Temperatur in die Berechnung miteinbeziehen.

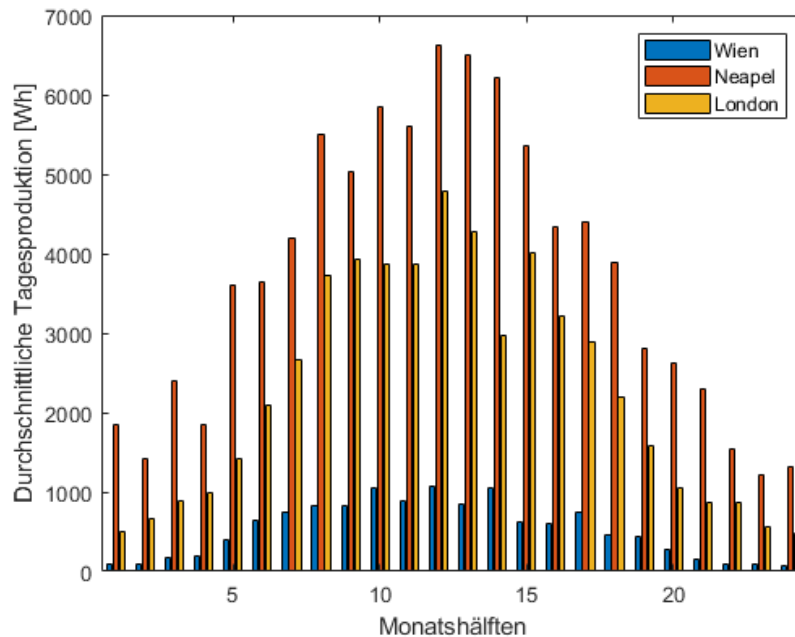


Abbildung 8: Die durchschnittliche Tagesproduktion der Standorte Wien, Neapel und London.

In Abbildung 8 wurde für die drei Standorte die durchschnittliche Tagesproduktion errechnet. Auch hier ist der Ertrag in Neapel am höchsten.

5.2 2.3.b

Das Ziel von Aufgabe 2.3.b war es die optimalen Aufstellwinkel der beiden zusätzlichen Standorte zu identifizieren.

Die Berechnung sowie der MATLAB Code wird in Aufgabe 2.2 beschrieben.

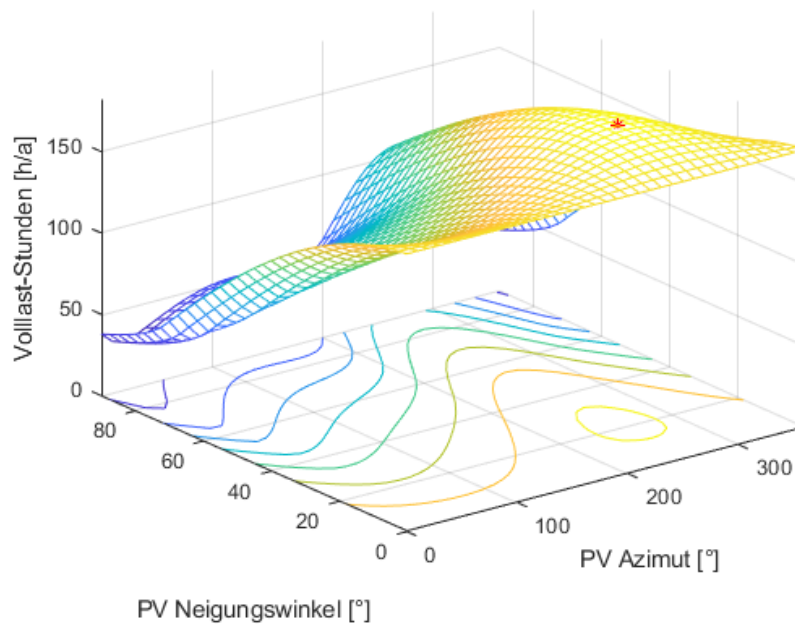


Abbildung 9: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, einer PV-Anlage mit Standort Neapel.

Für den Standort **Neapel** ergibt sich ein optimaler Azimut von 260° und ein optimaler Neigungswinkel von 22.5° . Die Volllaststunden sind damit 184.7692.

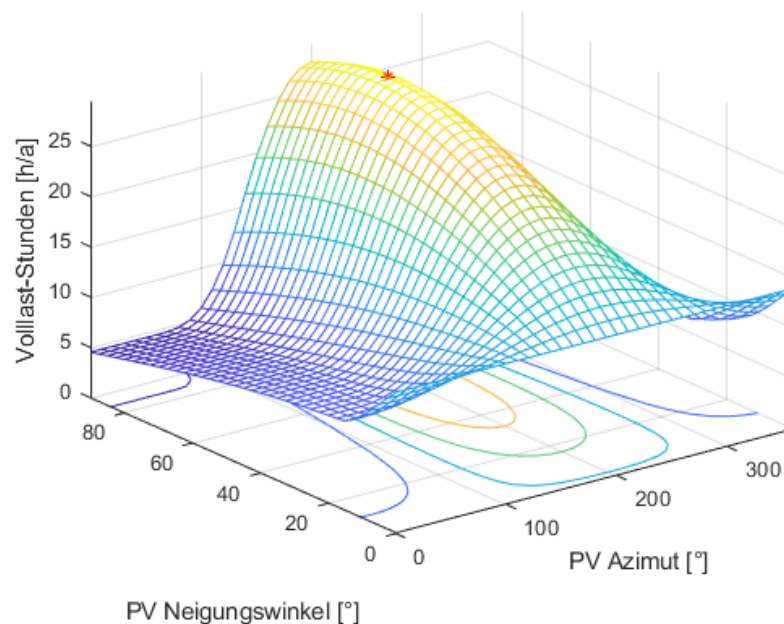


Abbildung 10: Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, einer PV-Anlage mit Standort London.

Für den Standort **London** ergibt sich ein optimaler Azimut von 200° und ein optimaler Neigungswinkel von 67.5° . Die Volllaststunden sind damit 33.2150.

Analog zu der Abhängigkeit der Volllaststunden von der Jahreszeit, kann man auch bei den Standorten erkennen, dass bei einer Einstrahlung, die fast senkrecht zum Horizont ist, ein geringer Neigungswinkel vorteilhaft ist. Dies ist bei Standorten, die nahe am Äquator liegen, der Fall.

London ist weiter vom Äquator entfernt, weshalb der Einstrahlungswinkel nicht sehr steil ist, wodurch wiederum ein höherer Neigungswinkel der PV-Anlage optimal ist.

5.3 2.3.c

Die Erzeugung aus PV-Anlagen weist an unterschiedlichen Standorten zeitliche Unterschiede auf. Diese sind einerseits tageszeitliche und andererseits saisonale Unterschiede. Gründe für tageszeitliche Unterschiede sind . Saisonale Unterschiede ergeben sich durch .

6 Literatur

- Modellierung eines Wärmeschichtspeichers mit Solareinbindung in Excel/VBA von Rainer Blabensteiner
- Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging von Thomas Huld, Ralph Gottschalg, Hans Georg Beyer und Marko Topic

Abbildungsverzeichnis

1	Differenz zwischen dem idealen und dem temperaturabhängigen Ertrag, über das Jahr 2005. (in Viertelstunden-Intervallen)	7
2	Vergleich der monatlichen Erträge der idealen und der temperaturunabhängigen Berechnung.	8
3	Vergleich der durchschnittlichen stündlichen Erträge, pro Tag, der idealen und der temperaturunabhängigen Berechnung.	9
4	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage.	12
5	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage.	13
6	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage, für das Monat Juni.	14
7	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, der PV-Anlage, für das Monat Dezember.	14
8	Die durchschnittliche Tagesproduktion der Standorte Wien, Neapel und London.	16
9	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, einer PV-Anlage mit Standort Neapel.	17
10	Die Anzahl der Volllaststunden in Abhängigkeit der Aufstellwinkel, einer PV-Anlage mit Standort London.	18