

PVTool Auslegungsprogramm

1. Einleitung

Das Programm PVTool wurde für die Auslegung von PCM's in Baukonstruktionen mit integrierten PV-Paneelen entwickelt. Es können damit Fassadenkonstruktionen sowie Dachkonstruktionen mit integrierten PV-Modul und einer PCM-Schicht bemessen werden. Als Ergebnis wird der zu erwartende Stromertrag über ein Jahr geliefert und in Varianten gegenübergestellt.

2. GUI

The screenshot displays the PVTool GUI with several sections highlighted by red boxes and letters:

- A:** Directory path: `/home/un/Schreibsch/PVTool`
- B:** Weather selection: `Weather File` (selected), `EPW File`
- C:** PV Module properties:
 - Neigung: 90, Orientierung: 180
 - PV Datenbank: `also 519.245`
 - Herstellerdaten:
 - Nennspannung (MPP) in V: 31.4
 - Nennstromstärke (MPP) in A: 8.44
 - Leerlaufspannung in V: 38.3
 - Kurzschlussstrom in A: 8.91
 - Type: `monocr`
 - Temperaturkoeffizient U_{oc} in %/K: -0.3
 - Temperaturkoeffizient I_{sc} in %/K: 0.03
 - Temperaturkoeffizient PMP in %/K: -0.43
 - Zellenzahl: 60
 - Anzahl der Module: 1
- D:** PCM selection: `SP28`
- E:** Lastprofil und Kosten:
 - Kosten pro Modul in €: 130
 - Zusatzkosten pro cm PCM in €: 10
 - Zusatzkosten PCM-Kapsel pro Modul in €: 10
 - Betrachtungszentrum: 20
 - Strompreis Einkauf in €/kWh: 30.04
 - Strompreissteigerung in %: 3
 - Strompreis Verkauf €/kWh: 10
- F:** Material properties:
 - Dichte in kg/m³: 35.0
 - spec. Wärmekapazität in J/kgK: 1500
 - Wärmeleitfähigkeit in W/mK: 0.0300
 - Dicke in cm: 6.0
- G:** Run Simulation button

Figure 1. Die Programmoberfläche vom PVTool

Das Programm gliedert sich in folgende Bereiche:

- Ausführungsverzeichnispfad [A]
- Bestimmung Klimadatensatz [B]
- PV-Moduleigenschaften [C]
- PCM-Eigenschaften [D]
- Angaben zum Lastprofil und den Kosten [E]
- Material-Eigenschaften der Dämmebene [F]
- Run-Simulation-Button [G]

2.1. Ausführungspfad

Hier wird der Pfad festgelegt, in dem die temporären Daten abgelegt werden. Dies kann direkt im Eingabefeld oder per Auswahlbutton erfolgen.

2.2. Klimadatensatz

Es gibt zwei Möglichkeiten den Klimadatensatz auszuwählen:

Möglichkeit 1:

Es wird aus den vorgegeben Klimadatensätzen ein bestimmter ausgewählt. Wichtig für die Berechnung ist, dass "Weather File" aktiviert ist.

Möglichkeit 2:

Per Nutzereingabe wird ein Klimadatensatz ausgewählt. Hierbei werden derzeit nur EPW-Formate unterstützt. "EPW-File" muss aktiviert sein, um die Berechnung mit dem selbstgewählten Klimadatensatz zu starten.

Eigene Wetterdaten können mit dem [CCM-Editor](#)¹ erstellt werden.

2.3. PCM

Hier kann ein PCM ausgewählt werden, welches bei der Berechnung verwendet wird. Es ist eine Datenbank bestehender PCMs hinterlegt, welche durch Nutzervorgaben erweitert werden kann. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes ein PCM-Material-Generator programmiert, welcher PCM-Materialdateien erstellt.



In der Entwicklungsphase wurde nur das PCM SP26 von [Rubitherm](#)² unterstützt.

2.4. Lastprofil und Kosten

An dieser Stelle kann ein Lastprofil eingeladen werden. Im Moment muss es eine tsv-Datei mit einer Spalte Time [h] und eine weitere Spalte für den Verbrauch [W].

¹ <https://www.bauklimatik-dresden.de/downloads.php>

² <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/anorganische-pcm-sp>

In der folgenden [PostProc Dokumentation](#)³ wird die Erstellung einer tsv-Datei detailliert beschrieben. In den weiteren Feldern können konkrete Angaben über die Kosten für die PV-Module und gegebenenfalls der PCM gemacht werden, sowie zu dem aktuellen Strompreis für Ein- und Verkauf. Mit diesen Angaben wird eine Kostenberechnung durchgeführt.

2.5. Insulation

Für die Dämmschicht, welche hinter dem PCM anschließt, werden hier die Materialeigenschaften (Dichte, Speicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit) sowie die Schichtdicke definiert.

2.6. Run Simulation

Nachdem alle Eingaben vorgenommen wurden kann hier die Simulationsstudie gestartet werden.

3. Berechnungsablauf

Nach dem Start des Programms werden automatisiert 3 Simulationsvarianten aufgesetzt. Dazu wird eine Referenzkonstruktion ohne PCM sowie 2 Konstruktionen mit PCM (PCM-Schichtdicke 1 cm und 2 cm) initialisiert. Die thermische Berechnung wird mit dem Solverkern [Delphin](#)⁴ durchgeführt. Die Projektdateien von DELPHIN werden automatisiert im temporären Verzeichnis erzeugt, diskretisiert und berechnet. Die Berechnungsergebnisse aus der DELPHIN-Simulation liefern die mittlere Modultemperatur sowie die Strahlung, die senkrecht auf das Modul auftrifft. Diese Ergebnisse werden für alle Stunden (8760 h) im Jahr berechnet. Im Zielordner befinden sich für jede Konstruktionsvariante Ordner der jeweiligen Iterationsschritte. Die Werte für Strahlung und Temperatur befinden sich im jeweiligen Ordner unter `results`, die Modultemperaturen in der `TMean.d6o`-Datei und die Strahlungswerte in der `GlobalRadiation.d6o`-Datei.

Anschließend übernimmt eine weitere Routine das Berechnen des Stromertrags. Die Ertragswerte werden im angegebenen Zielordner unter `power` abgelegt, wobei die `pv_power_drain`-Dateien nur für die weiteren Schritte der Delphin-Berechnung

³ <https://www.bauklimatik-dresden.de/postproc/help/de/index.html>

⁴ <https://www.bauklimatik-dresden.de/>

notwendig sind und keine Endergebnisse darstellen. Eingangsparameter für die Rechenroutine sind die mittlere Modultemperatur sowie die auftreffende Strahlung. Die Berechnung wird von der [SAM-Bibliothek](#)⁵ übernommen. Dadurch ist die Berechnung von Stromerträgen unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit möglich. Die Simulation wird iterativ dreifach durchgeführt. Dem Modul wird dabei die erzeugte elektrische Energie der vorausgegangenen Simulationsrechnung als thermische Energie entzogen und erneut der elektrische Energieertrag ermittelt. Spätestens bei der dritten Simulationsrunde sind die Energiemengen so ausiteriert, dass die physikalischen Prozesse exakt genug abgebildet werden ohne eine reale "Co-Simulation" umsetzen zu müssen.

Die Grundlage für die Berechnung des Stromertrags bildet das Ein-Dioden-Modell. Ebenso wurde die IBK-Bibliothek für die Umsetzung der Berechnungsmethodik genutzt.

4. Auswertung

Der Stromertrag wird für die oben erwähnten Varianten tabellarisch dargestellt. Zum Anzeigen kann das Programm [PostProc2](#)⁶ der Bauklimatik Dresden Software GmbH genutzt werden.

5. Zusatzprogramm PVEnergy

Falls berechnete Daten für die mittlere Modultemperatur und die Strahlung vorliegen kann direkt der Stromertrag berechnet werden. Dazu muss das Kommandozeilenprogramm PVEnergy ausgeführt werden. Die Ausführung kann wie folgt ausgeführt werden:

- Ausführung mit Batch-Datei
 - # für genau einen Zeitpunkt
 - # für Zeitreihenwerte
- Ausführung über Abrufen der Dateipfade

Das Vorgehen wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

⁵ <https://github.com/NREL/ssc/tree/develop/shared>

⁶ <https://www.bauklimatik-dresden.de/postproc/index.php>

5.1. Ausführung mit Batch-Datei

Eine mögliche Batch-Datei könnte wie folgt aussehen:

Example 1. Aufbau Batch-Datei

::hier muss der Pfad zu den notwendigen d6o-Dateien angegeben werden

set "filePath=..."

::Namen der zu berechnenden Eingangsdaten können hier angepasst werden

set "rad=GlobalRadiationSued1" set "temp=TMean1withPCM" set "result=PVEnergy1WithPCM"

copy "d6oDateien\%rad%.d6o" "results\" /y copy "d6oDateien\%temp%.d6o" "results\" /y

cd results

del "GlobalRadiation.d6o" del "TMean.d6o" pause

ren "%rad%.d6o" "GlobalRadiation.d6o" ren "%temp%.d6o" "TMean.d6o" pause

cd "%filePath%"

::Eingabezeile Parameter für die Berechnung mit PVEnergy PVEnergy.exe
15.57 8.25 18.17 8.71 0.06 -0.3 -0.39 28 298.15 "monoSi" -f="%filePath%"

ren "c:\temp\pvEnergy.d6o" "%result%.d6o" pause

Damit werden im Temp-Ordner die Ergebnisse der Berechnung mit PVEnergy gespeichert.

Die Parameter für die Berechnung werden anschließend erläutert. Folgende Ausführungsvarianten sind möglich:

Ausführung für genau einen Zeitpunkt

Für die Berechnung des Stromertrags für ein PV-Modul und einem Wertepaar für Temperatur und Strahlung ist folgender Kommandozeilen-Aufruf notwendig:

Der pvenergy.exe müssen dazu folgende Parameter in dieser Reihenfolge in die Kommandozeile übergeben werden:

- Spannung im Maximum Power Point (MPP) V_{mp} [V]
- Strom im MPP I_{mp} [A]
- Leerlaufspannung V_{oc} [V]
- Kurzschlussstrom I_{sc} [A]
- Temperaturkoeffizient Strom I_{sc} in [%/K]
- Temperaturkoeffizient Spannung V_{oc} in [%/K]
- Temperaturkoeffizient Leistung P_{max} in [%/K]
- Zellenanzahl pro Modul [-]
- Referenztemperatur [K]; Annahme meist 298.15
- Zelltyp

Derzeit sind die in [Table 1](#), "Zelltypen" gelisteten Zelltypen möglich.

Keyword: monoSi

- Mittlere Modultemperatur [K]
- Strahlung senkrecht aufs Modul [W/m²]

Table 1. Zelltypen

Zelltyp	Keyword
monokristallin	monoSi
Cadmiumtellurid Dünnschicht	CdTe
CIS-Dünnschicht	CIS
CIGS-Dünnschicht	CIGS
polykristallin	multiSi
amorph	Amorphous

Example 2. Kommandozeilenauf:

```
pvenergy.exe 31.4 8.44 38.3 8.91 0.05 -0.30 -0.43 60 298.15 monoSi
298.15 200
```

Ausführung für Zeitreihenwerte

Für die Berechnung des Stromertrags für ein PV-Modul und Zeitreihen für Temperatur und Strahlung müssen die Ergebnisse der Temperatur und Strahlung in einer d6o-Datei (DELPHIN-Ausgabeformat) mit folgenden Namen in einem Unterordner (mit dem Namen "results") vorliegen: 1 * TMean.d6o * GlobalRadiation.d6o

Beide Zeitreihen müssen exakt die gleichen Zeitpunkte enthalten. Für den Kommandozeilenauf Ruf müssen der pvenergy.exe folgende Parameter übergeben werden:

- Spannung im Maximum Power Point (MPP) [V]
- Strom im MPP [A]
- Leerlaufspannung [V]
- Kurzschlussstrom [A]
- Temperaturkoeffizient Strom in [%/K]
- Temperaturkoeffizient Spannung in [%/K]
- Temperaturkoeffizient Leistung in [%/K]
- Zellenanzahl pro Modul [-]
- Referenztemperatur [K]; Annahme meist 298.15
- Zelltyp

Derzeit nur das monokristalline Zelltypen möglich. Keyword: monoSi

- Pfad des results-Ordners. In aller Regel ist das der Ordner in dem die DELPHIN-Projektdatei abgelegt ist.

Example 3. Kommandozeilenauf Ruf:

```
pvenery.exe 31.4 8.44 38.3 8.91 0.05 -0.30 -0.43 60 298.15 monoSi -f="C:/temp/pvtool/project1-disc"
```

5.2. Alternatives Ausführen über Abrufen der Dateipfade

Vor dem Ausführen müssen zwei Dokumente erstellt werden:

- Messdaten als tsv-Datei
- Moduldaten als txt-Datei

Die Datei mit den Messdaten besteht aus folgenden Spalten:

Table 2. Aufbau der einzulesenden Datei

Spalte	Datenname	Einheit	Verwendung
1	time	[min]/[h]	<i>benötigt</i>
2	Einstrahlung aufs Modul	[W/m2]	<i>benötigt</i>
3	Modultemperatur	[C]	<i>benötigt</i>
4	Ertrag aus Messdaten	[W]	<i>optional</i>

Dabei ist die erste Zeile als Header-Zeile reserviert.

In den Moduldaten müssen die Parameter die gleiche Reihenfolge wie bei der Eingabe in die Kommandozeile (vgl. [Example 2](#), "Kommandozeilenaufruf:"). Die Werte werden immer aus der zweiten Zeile eingelesen. Die erste Zeile ist eine Header-Zeile.

Sind beide Dokumente im richtigen Format erstellt, kann die `pvenergy.exe` mit folgenden Befehl in der Kommandozeile ausgeführt werden:

Example 4. Kommandozeilenaufruf

```
pvenergy.exe -s "DateipfadMessdaten.tsv" "DateipfadModuldaten.txt"
```

6. Kostenkalkulation

Aufgrund der eingegeben Preise werden für die verschiedenen Varianten jeweils die Investkosten [€], die Betriebskosten [€] und die Gesamtkosten [€] nach dem angegebenen Betrachtungszeitraum berechnet. Die Investitionskosten setzen sich aus den Kosten der Module und den Kosten für die PCM samt Kapseln zusammen. Die Betriebskosten sind die reinen Kosten für den laufenden Betrieb, nach Abzug der Eigennutzung des erzeugten Stroms und der Kosten, die durch den Verkauf von Überschuss eingenommen werden. Die Ergebnisse sind der Ausgabedatei "cost.tsv" zu entnehmen.

7. Support

Der Support ist kostenpflichtig. Dazu kontaktieren Sie bitte [Dirk Weiß⁷](mailto:dirk.weiss@tu-dresden.de) oder [Heiko Fechner⁸](mailto:heiko.fechner@tu-dresden.de).

⁷ <mailto:dirk.weiss@tu-dresden.de>

⁸ <mailto:heiko.fechner@tu-dresden.de>

