Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Fotovoltaické články v solárních elektrárnách a měření jejich parametrů

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph. D

Autor: Jiří Kutta

Anotace:

V současné době dochází k velkému rozvoji alternativních (obnovitelných) zdrojů elektrické energie, zvláště k využívání solární energie. Tato práce obsahuje teoretický popis fyzikálního principu, popis používaných fotovoltaických článků, rozdělení článků podle použité technologie výroby, popis jejich měření, seznámení s měřením parametrů solárních zařízení v praxi, popis provedených měření.

Abstract:

Renewable sources of electric energy are currently being used. In the Czech Republic solar energy is especially used. This thesis contains theoretical description of physical principal, description of used photovoltaic modules and categorizing of modules according to applied production technology, description of measurements and measuring parameters of applied modules used in electric power production.

Prohlašuji, že předloženou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedené (citované) literatury.

Prohlašuji, že v souladu § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

Datum, podpis

Tímto děkuji svému konzultantovi doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce a dále Dipl.-Wirt.-Ing. Jiří Suchardovi za pomoc v praktické části práce.

Obsah:

1. Úvod a cíle práce

2. Princip fotovoltaických článků a solárních panelů používaných v energetice

2.1 Historie fotovoltaických článků

2.2 Teoretický úvod

2.3 Princip, druhy článků, provedení, materiály, účinnost, parametry

2.4 Praktické užití ve fotovoltaických elektrárnách

2.5 Bezpečnostní a ekologická hlediska modulů

3. Teorie měření fotovoltaických článků

3.1 Měřené veličiny

3.2 Použité přístroje a postupy

4. Praktické měření

4.1 Provedení konkrétního měření některých parametrů solárních panelů

4.2 Naměřené hodnoty

4.3 Porovnání naměřených údajů s údaji udávanými výrobci

5. Závěr

6. Použitá literatura

1. Úvod a cíle práce

V praxi se setkáváme s využitím fotovoltaických článků v solárních elektrárnách. Spojením více fotovoltaických článků vznikne fotovoltaický panel. Panely se vyrábějí obvykle o výkonu 100 - 140 $Wp.m^{-2}$ [1]. Tohoto výkonu článek dosahuje při ideálních podmínkách. Skutečný výkon je ovlivněn vlastními parametry článku závislými na technologii výroby, dále intenzitou dopadajícího světla závislou i na poloze článku vůči zdroji světla a samozřejmě na ploše článků. Plocha článků je navržena většinou do hodnoty 2 m^2, aby byla zajištěná dobrá manipulace při montáži.

Z výstupu článku odebíráme stejnosměrný proud. Pro přenos získané energie do rozvodné sítě je třeba celého systému skládajícího se z fotovoltaických článků, kabelů, měničů stejnosměrného napětí na střídavé napětí (střídačů), řídících prvků, jističů, výstupních transformátorů, nosné konstrukce atd., to celé pak můžeme nazvat solární elektrárnou [2, 3]. Samozřejmě všechny tyto jednotlivé komponenty ovlivňují účinnost celého systému. Tato práce je zaměřena na vlastní fotovoltaické články.

Cílem práce je:

- popis fyzikálních principů fotovoltaických článků
- seznámení se solárními články používanými v energetice
- vysvětlení měření, která se provádějí na solárních článcích
- provedení praktického měření parametrů článků

Hlavním cílem práce je provést konkrétní měření a provést vyhodnocení získaných údajů.

2.1. Historie fotovoltaických článků

Edmond Becquerel [4], francouzský fyzik, popsal roku 1839 fotovoltaický jev. V roce 1883 Charlesem Fritts [5] pak zhotovil fotovoltaický článek, když potáhnul selen velmi tenkou vrstvou zlata. Účinnost tohoto zařízení byla pouze jedno procento. Další osobou, která významně posunula tento obor vpřed byl Russell Shoemaker Ohl [6]. (narozen roku 1898, zemřel v roce 1987). Ten si nechal jako první konstrukci solárního článku patentovat [7] (US Patent 2402662, "Light sensitive device") [10]. Solární články jak, je známe dnes, byly poprvé vyrobeny roku 1954 firmou Bell Laboratoriem. Tam byla při objevena vysoká citlivost dopovaného křemíku na osvětlení. Fotovoltaické články této konstrukce v té tobě měly účinnost cca šest procent.

V kosmonautice je energie z fotovoltaických článků prakticky jediným zdrojem elektrické energie pro umělé družice země, raketoplány apod. Sputnik 3 byla první družicí s namontovanými fotovoltaickými články (na oběžnou dráhu byla vypuštěna 15.5.1957). V americké sondě Vanguard I (vypuštěné roku 1958) pracovaly solární články, v dobové terminologii nazývané „solární baterií“, 20 let. [2]

Dalším praktickým využitím bylo využití článků na ropných plošinách v Mexickém zálivu pro napájení osvětlení majáků a zařízení na ochranu kovových konstrukcí proti korozi. Do té doby bylo možné energii získat pro tato zařízení pouze z baterií a suchých primárních článků.

K rozvoji tohoto oboru velkou měrou přispěl i Albert Einstein, když roce 1905 s využitím kvantové fyziky pevných látek ve své práci popsal fotovoltaický jev. Za tento objev získal v roce 1921 Nobelovu cenu. [6]

2.2 Teoretický úvod

Fotoelektrický jev, nazývaný též fotoefekt, je fyzikální děj, při kterém jsou emitovány (vyzařovány) z materiálu elektrony (nejčastěji se jedná o kov) při absorpci elektromagnetického záření, nejčastěji rentgenového záření nebo viditelného světelného záření. Vyzařované elektrony jsou nazývány fotoelektrony a tento jev je označován termínem fotoelektrická emise – fotoemise. [4]

Fotoelektrický jev se pak dále dělí na vnější a vnitřní podle toho, zda se emitované elektrony uvolňují do okolí materiálu, nebo v něm zůstávají jako vodivostní elektrony.

Při osvětlení některých látek, především kovů, se tyto látky elektricky nabijí. Jako příklad můžeme uvést zinek, který se po osvětlení ultrafialovým zářením nabije kladným elektrickým nábojem.

Při ozáření látky spektrem elektromagnetického záření dochází k absorpci záření krátkých vlnových délek, zatímco část spektra s delšími vlnovými délkami pohlcovány nejsou.

Ozáříme-li látku elektromagnetickým zářením o krátké vlnové délce dochází při dostatečné energii a vhodné látce (například kovy) k emisi elektronů. Zvýšením intenzity záření dochází ke zvýšení počtu elektronů, nikoli ke zvýšení jejich energie.

Na základě představ klasické fyziky by měla být elektronům předána veškerá kinetická energie dopadajícího elektromagnetického záření. Energie vyzářených elektronů by měla být podle této představy závislá na intenzitě dopadajícího záření. Experimentálně bylo prokázáno, že kinetická energie vyzařovaných elektronů je závislá na frekvenci a ne na intenzitě dopadajícího záření.

V případě, že frekvence dopadajícího záření klesne pod mezní (prahovou) frekvenci v_0, k fotoemisi elektronů nedochází. Při vyšší než mezní frekvenci je hodnota energie elektronů v intervalu nula až maximální hodnota E_{max}. [5]

Maximální hodnota energie E_{max} [J] je lineární funkcí frekvence a je určena vztahem

$$E_{max} = h(v - v_0) = hv - hv_0 \qquad (1)$$

kde h je Planckova konstanta. V jednotkách SI má hodnotu: $h = 6{,}62\ 10^{-34}$ J.s, v je frekvence dopadajícího záření [Hz], v_0 je mezní frekvence [Hz]

Vysvětlení fotoelektrického jevu pomocí poznatků klasické fyziky není možné.

Kvantové vysvětlení

S využitím kvantové teorie chování světla vysvětlil Albert Einstein v roce 1905. Tuto teorie rozvinul dále Max Planck. [6] Popsal, že elektromagnetické vlnění předává svou energii při interakcích s jinými částicemi nespojitě, ale po takzvaných kvantech. Velikost kvanta energie E [J] závisí na frekvenci υ[Hz], případně vlnové délce λ [m].

$$E = h\upsilon = \hbar\omega \tag{2}$$

kde h je Planckova konstanta [J.s], ν je frekvence elektromagnetického záření [Hz]

$$\omega = 2\pi\nu \tag{3}$$

ω je kruhová frekvence elektromagnetického záření [Hz]

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \tag{4}$$

$\hbar$ je redukovaná Planckova konstanta, označovaná též jako foton [J.s]

Dopadající světlo předává energii elektronům na povrchu zkoumané látky. Při dostatečně malé vlnové délce je frekvence ν a tedy i energie předaná po dopadu dostatečná k uvolnění tohoto elektronu z atomární vazby. Tato energie je pak označována jako energie ionizační.

Fotoelektrickou bariérou pak označujeme velikost ionizační energie potřebnou k uvolnění elektronů z látky. Při předání dostatečné energie elektronům dochází k překonání této bariéry. Tato energie je ekvivalentní výstupní práci. Minimální frekvence, při níž dopadající fotony předávají elektronům energii potřebnou k překonání této bariéry, je označována jako prahová frekvence.

Je-li energie předaná elektronu větší než je potřeba k jeho uvolnění z atomární vazby (energie je větší než výstupní práce), fotoelektronu po emisi z látky část energie zůstane. Tato energie má formu kinetické energie elektronu.

Energie emitovaného elektronu je závislá jen na frekvenci dopadajícího záření, nikoliv však na intenzitě dopadajícího záření.

Pro frekvence nižší než je mezní frekvence v_0 fotoemise nenastává. [4, 5]

Inverzní fotoelektrický jev

Při dopadu elektronů způsobujících emisi fotonů hovoříme o inverzním fotoelektrickém jevu. Energie pohybujícího se elektronu bývá podstatně větší než potenciálová bariéra. Z tohoto důvodu lze hodnotu výstupní práce zanedbat vzhledem ke kinetické energii elektronu. [4]

$$E_k = hv \tag{5}$$

E_k je kinetické energie [J], h Planckova konstanta [J.s], v frekvence elektromagnetického záření [Hz]

Ke ztrátě kinetické energie elektronu dochází při jeho dopadu na kov k několika postupným srážkám s částicemi hmoty, kdy je postupně uvolňována energie ve formě tepelného záření.

Fotony rentgenového záření vznikají v případě, že elektron ztratí po dopadu veškerou svoji energii naráz. Dojde-li k přeměně energie elektronu ve foton jedním nárazem, energie E_k [J] dodaná fotonu bude největší.

$$E_k = hv_{max} = eU \tag{6}$$

e je elementární elektrický náboj elektronu $e = 1{,}602.10^{-19}$ C, U je urychlující elektrické napětí [V] [5]

Pásový energetický model

Každému jednotlivému atomu náleží rozložení jeho energetických hladin. Při vzájemném působení atomů, např. při tuhnutí kovů, se v důsledku tohoto přiblížení vytvoří energetické hladiny, které jsou od sebe nepatrně vzdáleny a tvoří tak

energetický pás. Jako první vznikne pás s největší energií. Dalším přibližování atomů postupně vznikají pásy s nižšími energiemi.

Energetické pásy představují dovolené energetické stavy, v nichž se mohou elektrony v látce vyskytovat. Dle Pauliho vylučovacího principu mohou být na jedné energetické hladině pouze dva elektrony. Dovolené energetické hladiny jsou od sebe odděleny zakázanými pásy. Není možné, aby se v látce vyskytovaly dva elektrony mající energii odpovídající zakázaným pásům.

Z energetického hlediska je nejdůležitější pás valenční, vznikající z hladiny valenčních elektronů a vodivostní pás, jenž není obsazen elektrony. Vodivostním pásem se rozumí oblast dovolených hladin energií elektronů, při kterých jsou v látce elektrony volně pohyblivé, přenášejí elektrický náboj a tím je vyvoláván elektrický proud.

Valenční a vodivostní pásy jsou oddělené tzv. zakázaným pásem. Toto uspořádání nazýváme pásovým energetickým modelem. Důležitou charakteristickou vlastností je vzájemná vzdálenost těchto pásů.

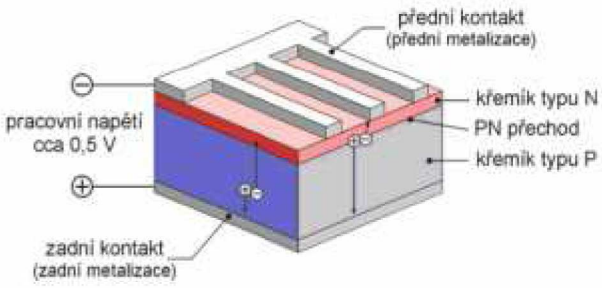
V případě širokého zakázaného pásu hovoříme o nevodičích, elektron nedosahuje takových hodnot energie, aby překonal šířku zakázaného pásu. Pokud je šířka zakázaného pásu taková, že elektron má dostatek energie pro její překonání, jedná se o polovodič.

U vodičů zakázaný pás téměř neexistuje. [4, 5]

Obr. č. 1 Pásový model pevné látky, převzato z [11]

2.3 Princip, druhy článků, provedení, materiály, účinnost, parametry

Ve fotovoltaickém článku se prakticky využívá fotoelektrický jev.



Obr. č. 2 Fotočlánek – princip, převzato z [1]

Druhy článků [12, 2]

Křemíkové články:

- monokrystalické články – použitý jediný krystal
- polykrystalické články – sestaven z mnoha různě orientovaných krystalů
- amorfní články – tvořen amorfní křemíkovou vrstvou

Obr. č. 3 Monokrystalický článek , převzato z [13]

Obr. č. 4 Polykrystalický článek , převzato z [13]

Obr. č. 5 Amorfní článek , převzato z [13]

Obr. č. 6 Amorfní článek, jiné provedení, převzato z [13]

Obr. č. 7 Amorfní články – příklad realizace, převzato z [13]

Fotovoltaické články vyrobené technologií tlustých vrstev [12, 2]

Fotovoltaický článek je vyroben jako velkoplošná polovodičová dioda s p-n přechodem. K výrobě těchto článků se používá monokrystalický nebo polykrystalický křemík. Jedná se o nejrozšířenější technologii s přibližně 85% podílem na trhu.

Fotovoltaické články vyrobené technologií tenkých vrstev [12, 2]

Jako nosná plocha fotovoltaického článku je použita textilie, sklo apod. Na tuto vrstvu je při výrobě nanesena velmi tenká vrstva mikrokrystalického případně amorfního křemíku. S ohledem na menší spotřebu materiálu, je dosaženo nižší ceny článku v porovnání s předcházející technologií. Při srovnání životnosti a účinnosti článků je však lepších výsledků dosaženu u technologie tlustých vrstev.

Fotovoltaické články vyrobené nekřemíkovými technologiemi [12, 2]

Pro přeměnu světla v elektrickou energii se nepoužívá polovodičových přechodů jako u předešlých technologií, nýbrž se experimentuje s jinými materiály jak například s polymery a jinými organickými sloučeninami. Cílem je dosažení příznivější ceny článku v porovnání s drahým křemíkem.

Výrobci

Jako příklad jsou dále uvedeni někteří výrobci solárních panelů pro fotovoltaické elektrárny: SOLON SE Berlin®, Německo, SCHOTT Solar CR, s.r.o.® , First Solar®,

Německo, PV Enterprise Sweden AB®, Würth Solar®, Heckert Solar®, Jiangyin SHINE Science and Technology Co.,Ltd®, Trina Solar, Sanyo®, Sun tech®

2.4 Praktické užití ve fotovoltaických elektrárnách

Fotovoltaickou elektrárnou nazýváme sestavu solárních panelů, zařízení pro přeměnu získaného stejnosměrného napětí na střídavé - střídačů, řídících prvků a mechanických částí (stojanů pro články ať už pevných nebo v klimatických podmínkách České republiky zřídka používaných natáčecích stojanů) dále je každá elektrárna vybavena měřením vyrobené energie, rozvodnými kabely a samozřejmě jistícími prvky. Elektrárny se odlišují provedením i výkony, ale princip je stejný: Dodat energii získanou ze slunečního záření do elektrické rozvodné sítě.

Můžeme zmínit tzv. ostrovní systémy, které na rozvodnou síť napojeny nejsou, ale tam je to právě proto, že síť není v místě vybudována a tyto elektrárny zdroj energie nahrazují. Jinak v ostatních případech provozovatelé elektráren využívají dotací poskytovaných při výkupu energie vyrobení ze slunečního záření, bez kterých by byla v současné době investice vložená do výstavby za dobu životnosti zařízení a dalších souvisejících nákladů ekonomicky nerentabilní.

Z technického hlediska je v současnosti nejčastějším technickým řešením použití fotovoltaických panelů s články z monokrystalického či polykrystalického křemíku o jednotkových výkonech panelů cca 180 – 280 W, jejichž jmenovitá účinnost se běžně pohybuje mezi 13 – 15 %. Dalším řešením, které vzhledem k tomu, že jde o novou technologii není tak časté, je použití tenkovrstvých panelů CdTe (Kadmium Teluride), případně CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), či jiných polovodičových sloučenin. Jednotkový výkon tenkovrstvých panelů je nižší než u panelů na bázi křemíku, cca 50-100 Wp a účinnost dosahuje cca 8-11%, výhodou jsou nižší či srovnatelná cena s křemíkovými panely a v podmínkách střední Evropy srovnatelná či mírně vyšší výroba na instalovaný kWp. Nevýhodou je vyšší plošná náročnost.

Křemíkové i tenkovrstvé panely jsou v rámci polí zapojeny sérioparalelně a stejnosměrné napětí je na běžné střídavé jednofázové či třífázové napětí 230/400V, 50 Hz přeměněno v decentralizovaných či centrálních měničích. Elektrická energie o běžných síťových parametrech je pak vyvedena do veřejné sítě nn nebo přes trafostanici do sítě vn.

Fotovoltaické panely je možno umístit na pevné konstrukce s optimálním nastavením azimutu a sklonu panelu (v podmínkách ČR cca 30 - 40°). Tímto způsobem je konstruována většina stávajících a projektovaných solárních elektráren v ČR, jedná se o jednoduché a neproblematické řešení jak z hlediska výstavby, tak i z hlediska provozu.

Navýšení výroby je možno dosáhnout případným umístěním fotovoltaických panelů na konstrukce s jedno- či dvouosým natáčecím zařízením (trackerem), které zajistí optimální orientaci panelu (a pokud možno kolmý dopad paprsků na panel) po celý den. Trackery oproti pevným nosným konstrukcím panelů představují ale dodatečný investiční náklad, jsou prostorově náročnější, a je nutno umístit je na volné plochy do betonových základů či bloků (není možné či je technicky velmi komplikované jejich umístění např. na střešní konstrukce).

Jednoosé trackery mají pevný sklon panelů a dochází pouze k natáčení kolem jedné osy od východu k západu. Navýšení výroby oproti pevnému systému je v našich podmínkách cca 25%. Systémy s dvouosým natáčecím zařízením sledující Slunce dle azimutálního i elevačního úhlu umožňují zvýšit výrobu elektrické energie až o 30-40%. Jejich efektivita je dána samozřejmě tím, nakolik toto navýšení výroby pokryje vyšší investiční náklady, větší nároky na plochu pozemku (vzájemné zastínění) a vyšší provozní náklady na údržbu a opravy. [2, 3, 12]

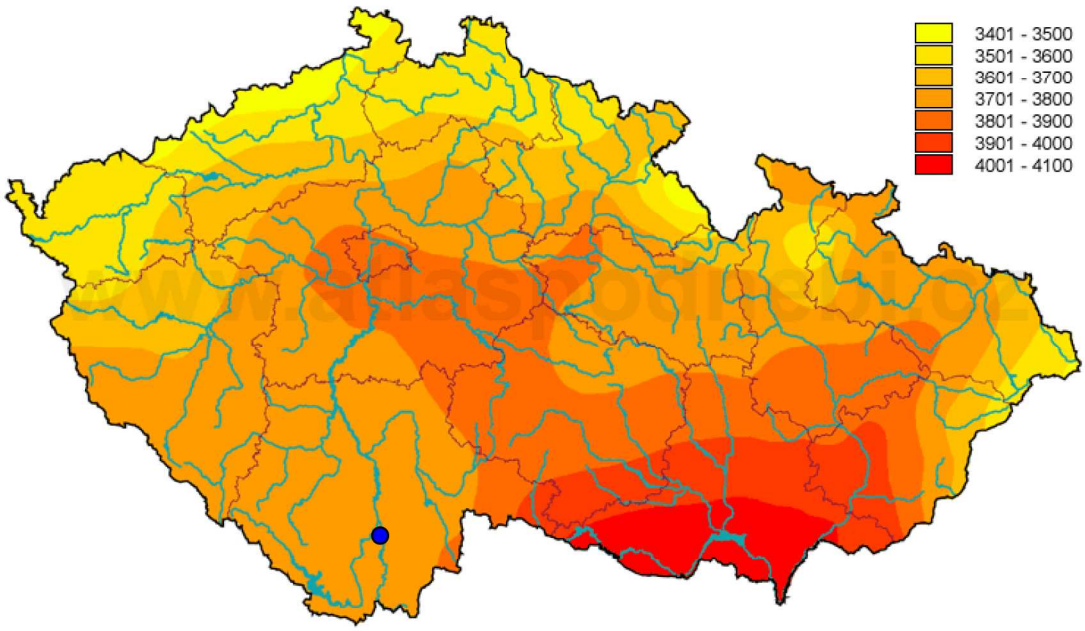
Obr. č. 8 Fotovoltaická elektrárna Morašice, instalovaný výkon 1 065 kWp, převzato z [14]

Obr. č. 9 Fotovoltaická elektrárna Lukavice, instalovaný výkon 1 595 kWp, převzato z [15]

Obr. č. 10 Fotovoltaická elektrárna Bohuňovice, instalovaný výkon 3 011 kWp, převzato z [16]

Obr. č. 11 Obec Lomec, elektrárna na rodinném domě, foto autor

Obr. 12 Obec Lomec, elektrárna na rodinném domě, celkový pohled, foto autor



Obr. č. 13 Průměrný roční úhrn globálního záření [MJ.m^{-2}], modrou tečkou označena oblast měření fotovoltaického článku popsané v čl. 4, převzato z [17]

2.5 Bezpečnostní a ekologická hlediska modulů používaných ve fotovoltaických elektrárnách [18]

Tato hlediska jsou popsána pro nejvíce rozšířené moduly (modul = fotovoltaický článek připravený pro praktické použití, tedy opatřený kabely, zapouzdřený pro ochranu proti povětrnostním vlivům, opatřený přípravky na mechanické upevnění) vyrobené technologií tenkých vrstev. Používají se sloučeniny CdTe a CD. CdTe je stabilní sloučenina kadmia (Cd) a teluru (Te). Kadmium jako prvek je těžký kov vyráběný především jako vedlejší produkt v průběhu rafinace zinku a olova. V případě jeho požití v elementární formě může mít karcinogenní účinky. Telur se získává jako vedlejší polokovový (metaloidní) produkt v průběhu rafinace mědi a olova.

Po vzniku sloučeniny a jejím zapouzdření v modulech se ukazuje, že CdTe je optimální sloučeninou pro přeměnu slunečního záření na použitelnou elektrickou energii. Za normálních provozních podmínek nepředstavuje sloučenina žádné riziko pro životní prostředí. Moduly CdTe neobsahují volné atomární kadmium. Pro výrobu jednoho modulu je použito 5 až 7 gramů kadmia ve formě stabilní sloučeniny CdTe. Výroba CdTe modulů zajišťuje odstraňování kadmia, jako zbytku po těžbě, ze životního

prostředí a převádí tento prvek na ekologicky stabilní polovodič pro výrobu elektrické energie.

Bezpečnost modulů [18]

Zapouzdření do skla solárního modulu zabraňuje vyluhování nebo vyloučení CdTe do atmosféry, vody nebo do země a to i v případě poškození nebo požáru.

Ovzduší: Kadmium zůstává bezpečně uzavřeno a zachyceno ve skleněné matrici modulu a to i
v případě požáru. Skleněné moduly vystavené širokému rozsahu teplot (760 –1100 °C) neuvolňují kadmium do životního prostředí.

Voda: Z poškozených CdTe modulů vystavených dešti nejsou vyplavovány žádné nebezpečné látky.

Půda: Kousky rozbitých PV modulů na bázi CdTe ponechané v půdě po dlouhou dobu nezvyšují koncentraci nebezpečných látek v půdě. Zkoušky výrobců prokázaly, že prokázané koncentrace jsou 13krát nižší než hodnoty povolených regulačních limitů.

Politika konce životnosti výrobků [18]

Dalším hlediskem které musí provozovatel fotovoltaické elektrárny zohlednit je způsob likvidace po skončení životnosti zařízení. Většina výrobců to řeší tak, že za každý prodaný modul uloží firma sumu prostředků, která bude dostatečně velká, aby umožnila nahrazení nákladů regenerace a recyklace daného výrobku. Tyto prostředky jsou určeny výhradně pro krytí nákladů regenerace a recyklace a jsou obvykle chráněny globálním pojištěním. Jsou také chráněny proti bankrotu. Celý program je v souladu s postupem integrované politiky výrobků Evropské komise, jehož principy jsou zakotveny ve sdělení Evropské komise pro Radu a Evropský parlament (COM(2003)302 závěrečný) [19].

Firmy poskytují smluvní odběr svých modulů a jejich odeslání do zpracovatelského centra, kde jsou tyto výrobky recyklovány a slouží k výrobě nových modulů, nebo se využívají při výrobě jiných průmyslových výrobků. Všechny součásti

modulů, včetně skla a zapouzdřených polovodičových materiálů a kovů, budou recyklovány. Zpracované materiály budou separovány a uskladněny do té doby, než budou použity při výrobě nových výrobků. Tento systém zajistí, že se tyto materiály nikdy nedostanou do oběhu jako odpady. Zákazníci dodavatelů modulů jsou vyzváni, aby provedli registraci místa, kde jsou jejich moduly nainstalovány. Vlastníci modulů mohou kdykoliv požádat o odstranění jejich modulů z jakéhokoliv registrovaného místa instalace. Původní vlastník tak bude vyvázán z jakékoliv další odpovědnosti nebo případných povinností a závazků.

3. Teorie měření fotovoltaických článků

3.1 Měřené veličiny

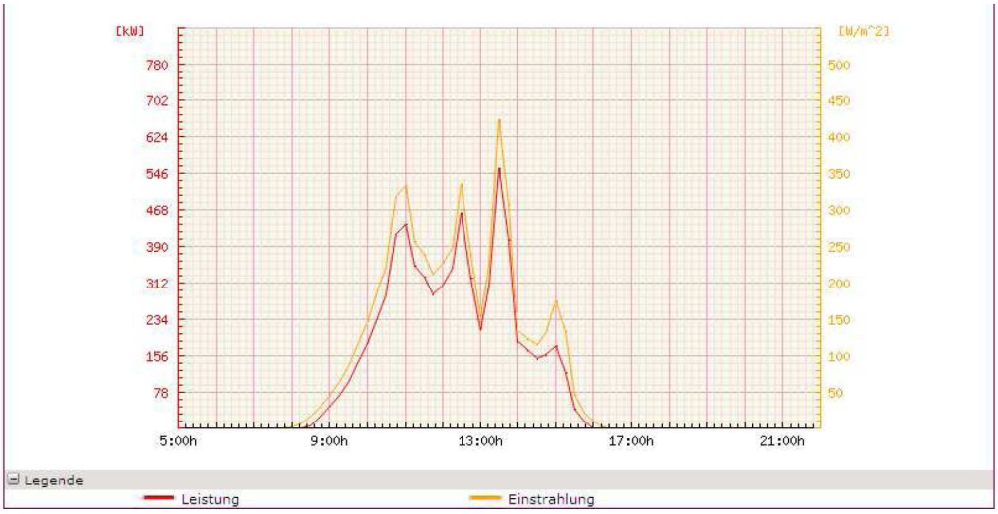
Jmenovitý výkon fotovoltaických článků je udáván v jednotkách watt peak, neboli špičková hodnota, značeno Wp. Výkon článku závisí na intenzitě osvětlení a na úhlu, pod kterým světlo na článek dopadá. Výkon fotovoltaických článků udávaný výrobci se měří při předem definovaných podmínkách: [20]

Výkonová hustota slunečního záření 1 000 $W \cdot m^{-2}$
Spektrum záření AM1.5 (AM = Air Mass je tloušťka atmosféry, kterou musí projít sluneční záření; pro Evropu je to hodnota 1,5; je-li Slunce v nadhlavníku, pak AM = 1)
Teplota solárního článku 25 °C. [20]

3.2 Použité přístroje a postupy [18]

Ve fotovoltaických elektrárnách se pro vyhodnocování účinnosti provozu provádí měření celé soustavy zařízení. Velké elektrárny jsou osazeny komplexním systémem čidel a převodníku pro přenos dat z jednotlivých sektorů (výstupů jednotlivých stolů), střídačů (sledují se parametry na stejnosměrné (DC) i výstupní (AC) části a tato data jsou odesílána pomocí periferních zařízení k vyhodnocení. Pro vyhodnocení účinnosti provozu se měří osvit článků i teplota na panelech. To umožňuje měřit následující data.

Používá se speciální software, obvykle se data odesílají k vlastnímu zpracování po síti Internet. Níže jsou jako příklad uvedeny konkrétní naměřené hodnoty použité se svolením společnosti JUWI s.r.o.



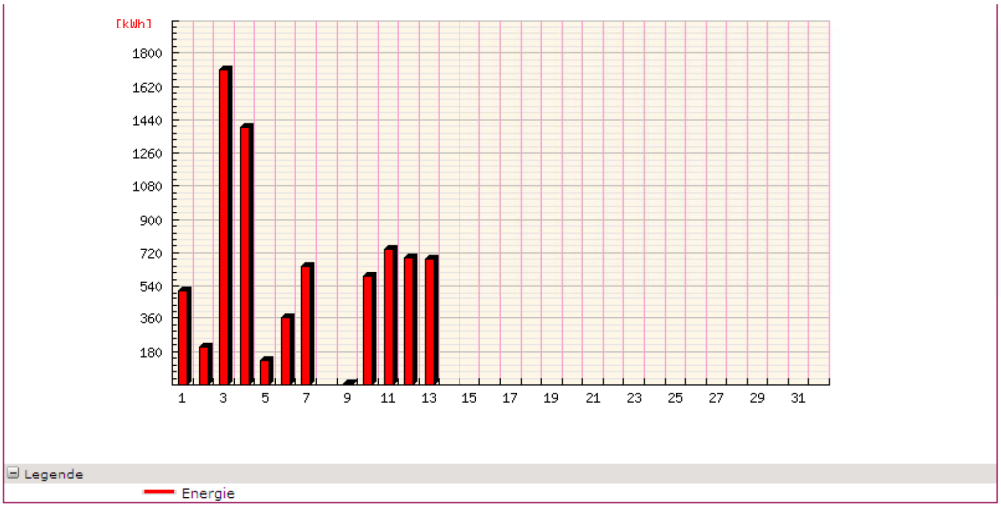
Berechnung | Bewertung | Information

	Tageswerte	Einheit	Maximalwert	Einheit
Strahlungssumme	1,3	kWh/m²	423,0	W/m²
Energie	1.709,5	kWh	555,5	kW
Spez. Energie	1,1	kWh/kWp		
Nennleistung	1.560,0	kWp		

Graf č. 1 Výstupy z portálu Meteocontrol® ve fotovoltaické elektrárně, převzato z [18].

Tento graf vyjadřuje závislost výroby (červená křivka – jedná se o přenos digitálních impulzů z měřících hodin, osazených v poli měření společností ČEZ/EON) a slunečního záření (žlutá křivka — snímání probíhá pomocí slunečních senzorů)

Stahlungssumme	suma slunečního záření
Energie	výroba
Spez. Energie	specifická výroba(podíl výroby a výkonu elektrárny)
Nennleistung	výkon elektrárny
Tagerwerte Einheit	denní hodnoty
Maximalwert Einheit	maximální dosažené hodnoty



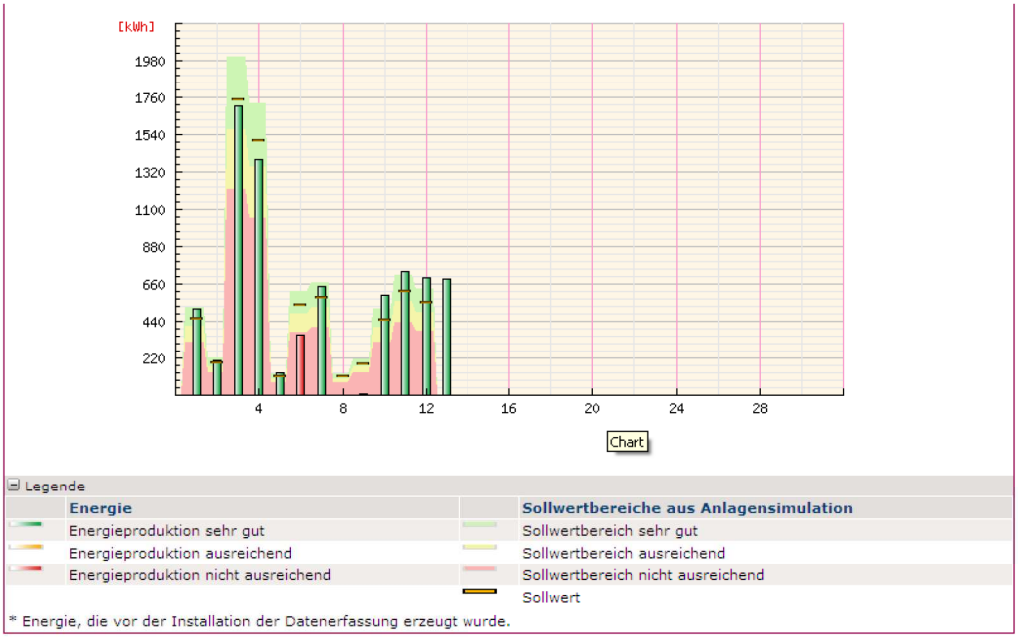
Berechnung | Bewertung | Information

	Monatswerte	Einheit	Jahreswerte	Einheit
Energie (Messtechnik)	7.677,9	kWh	7.677,9	kWh
Energie (Zählerstand)	7.677,9	kWh	7.677,9	kWh
Spez. Energie	4,9	kWh/kWp	4,9	kWh/kWp
Nennleistung	1.560,0	kWp		

Graf č. 2 Měsíční výroba jako součet výroby v jednotlivých dnech, převzato z [18].

Na tomto grafu je vidět součet výroby ve dnech 1. až 13. ledna 2010. Dny jsou na ose x grafu. Týdenní i roční hodnoty jsou v tomto případě stejné. Hodnoty měřené ve střídačích i na měřících hodinách odběratele jsou v tomto případě pod hranicí přesnosti měření – stejné hodnoty.

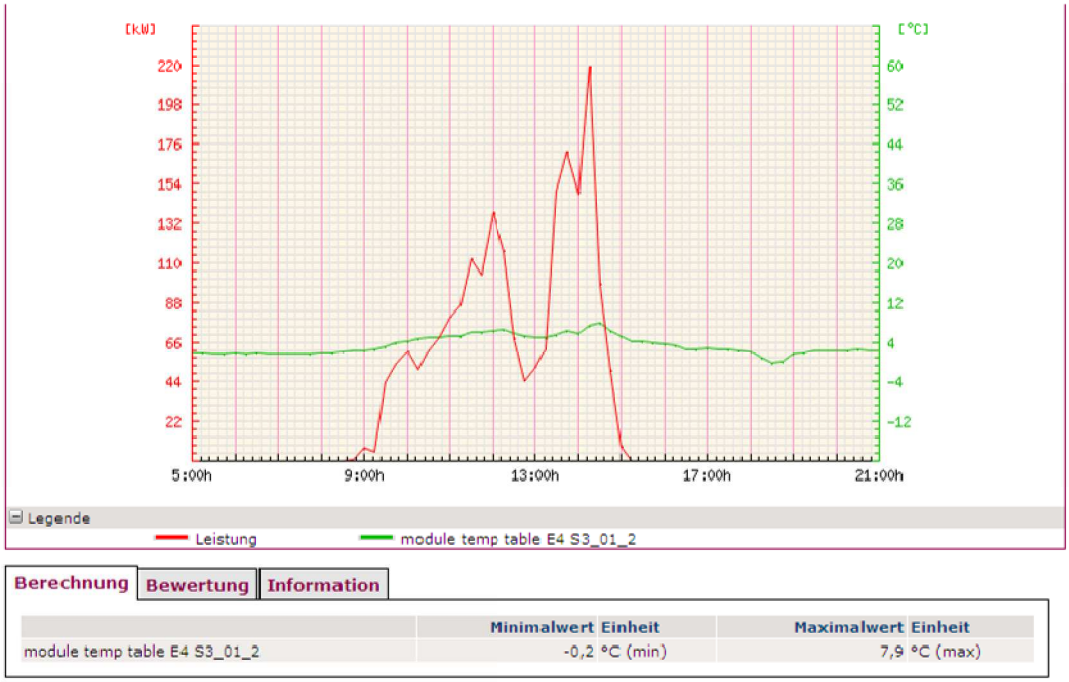
Energie (Messtechnik)	výroba (měřeno ve střídačích)
Energie (Zählenstand)	výroba (měřeno na hodinách ČEZ/EON)
Spez. Energie	specifická výroba (podíl výroby a výkonu elektrárny)
Nennleistung	výkon elektrárny
Monatwerte Einheit	týdenní hodnoty
Jahreswerte Einheit	roční hodnoty



Graf č. 3 Srovnání výroby v závislosti na slunečním záření, převzato z [18].

Graf zobrazuje porovnání výroby v závislosti na očekávaném slunečním záření. Údaje vycházejí z dlouhodobého statistického sledování osvitu v dané lokalitě. Jedná se o příklad zimního měsíce, kdy panely jsou částečně pod sněhem a výroba velmi kolísá.

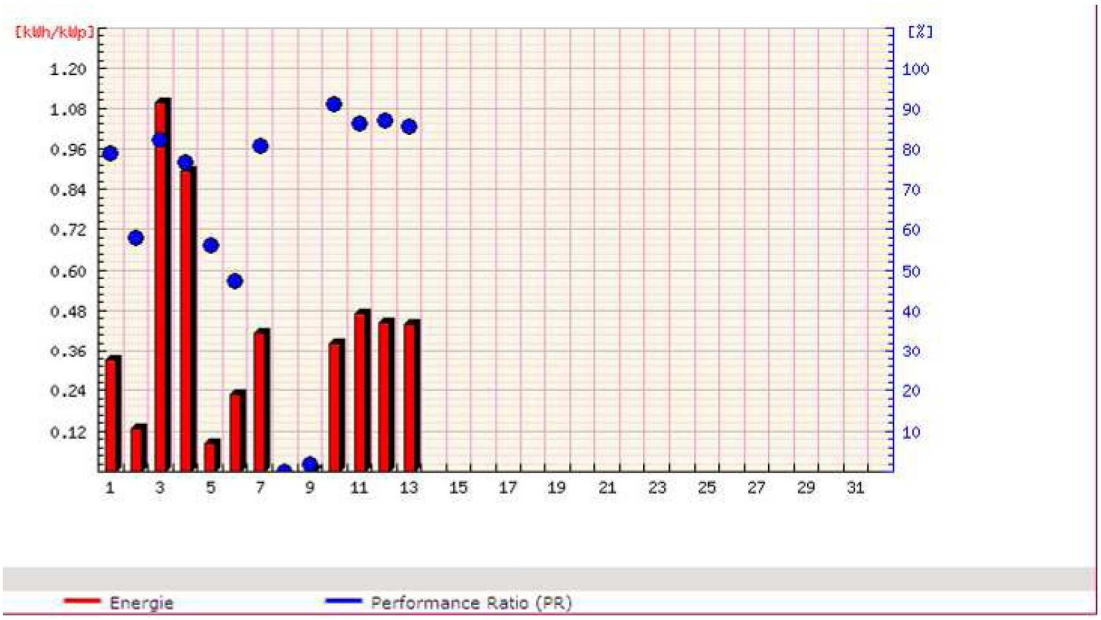
Energie	výroba
Energieproduction sehr guth	výroba velmi dobrá
Energieproduction ausreichend	výroba vyhovující
Energieproduction nicht ausreichend	výroba nevyhovující
Sollwertbereiche aus Anlagensimulation	intervaly očekávaných hodnot
Sollwertbereiche sehr guth	intervaly očekávaných hodnot velmi dobré
Sollwertbereiche ausreichend	intervaly očekávaných hodnot vyhovující
Sollwertbereiche nicht ausreichend	intervaly očekávaných hodnot nevyhovující



Graf č. 4 Srovnání výkonu v závislosti teplotě modulů., převzato z [18].

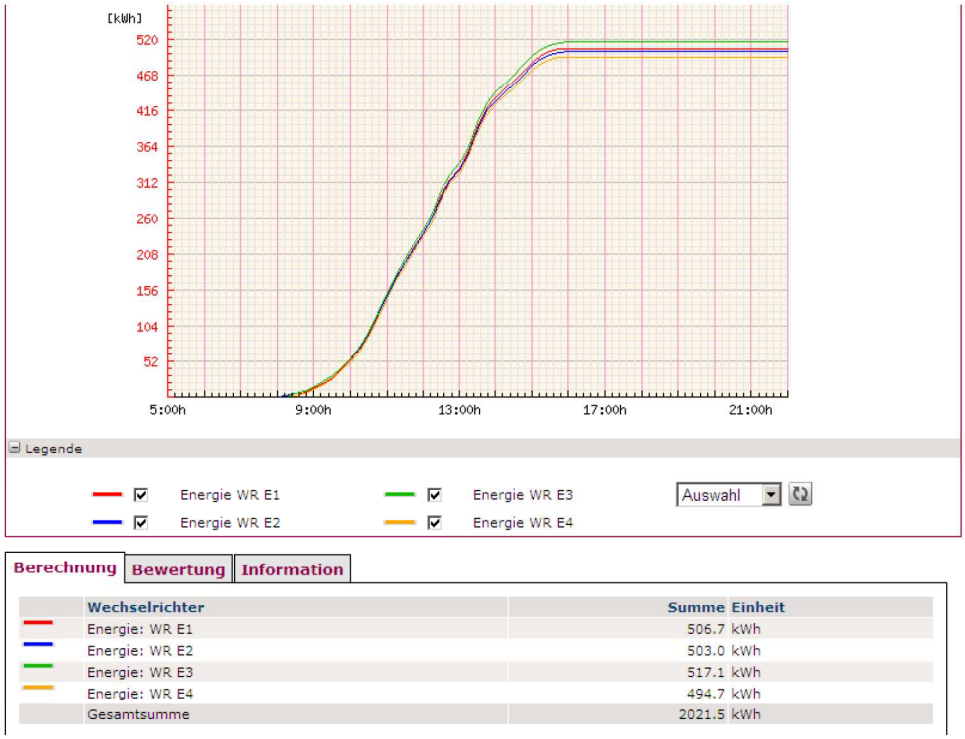
Červená křivka označuje výkon sledovaného modulu, zelená křivka pak teplotu modulu. Údaje jsou využívány pro určení teplotního koeficientu při sledování poklesu výkonu v závislosti na teplotě modulu.

module temp table E4 S3_01_2	teplota modulu E4 S3_01_2
Minimalwert Einheit	minimální dosažená teplota
Maximalwert Einheit	maximální dosažená teplota



Graf č. 5 Performance Ratio, převzato z [18].

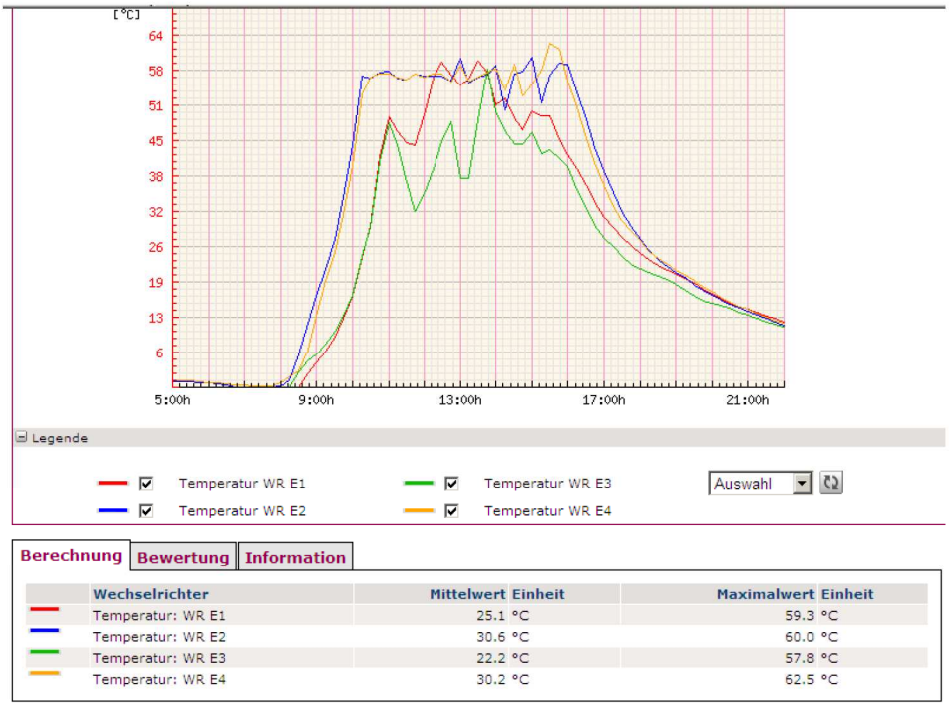
Modré body značí Performance Ratio, tedy poměr vyrobené energie k očekávanému výkonu elektrárny. Toto je závislé zejména na počasí a na sněhové pokrývce. Použity stejné vstupní hodnoty jako v grafu č. 2. Je použit přepočet specifické výroby (podílu výroby a výkonu elektrárny) k očekávaným hodnotám viz. graf č. 3. Sledovanému parametru odpovídá pravé modré měřítko grafu (0 – 100%).



Graf č. 6 Výroba jednotlivých střídačů, převzato z [18].

Křivka grafu zobrazuje výrobu jednotlivých střídačů. Přenos dat ze střídačů probíhá pomocí software SMA® přímo do portálu Meteocontrol®. Měří se výkon na stejnosměrné (DC) straně a střídavé napětí na výstupu střídačů (AC) strana.

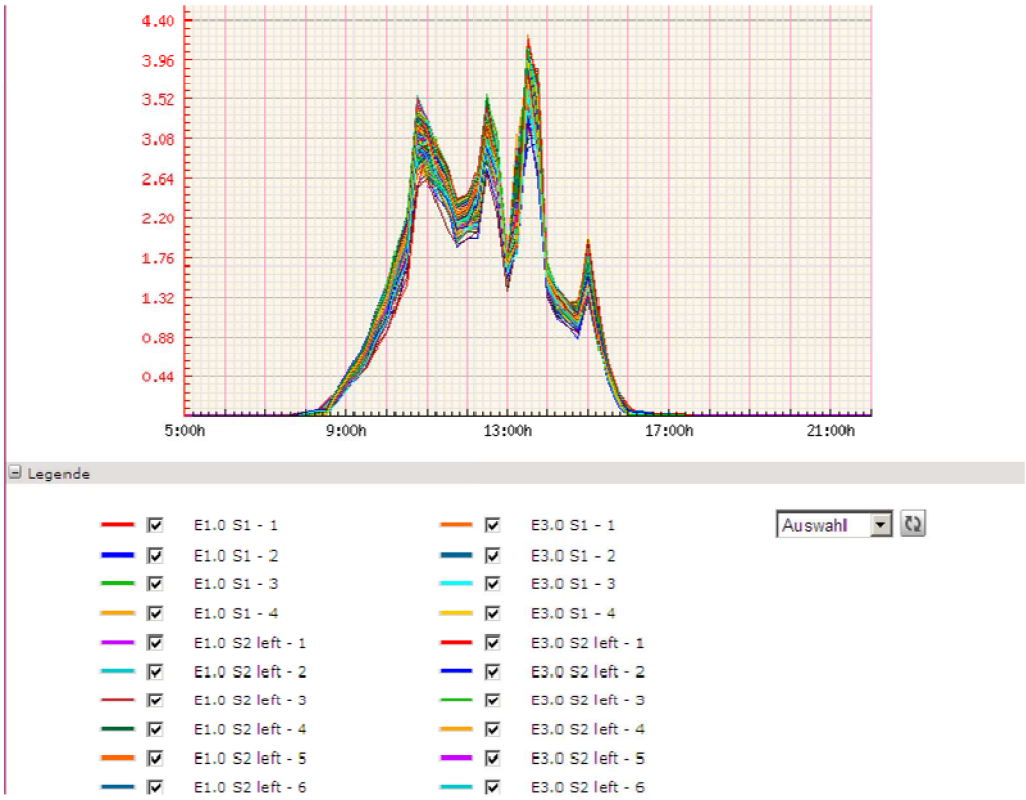
Energie WR E1 ÷ E4	výroba střídačů WR E1 ÷ E4
Wechselrichter	výstup AC
Summe Einheit	denní hodnota výroby



Graf č. 7 Kontrolní a dohledové měření, převzato z [18].

Zde je znázorněno kontrolní a dohledové měření. Je sledována teplota střídačů napětí a vyhodnocován jejich provoz.

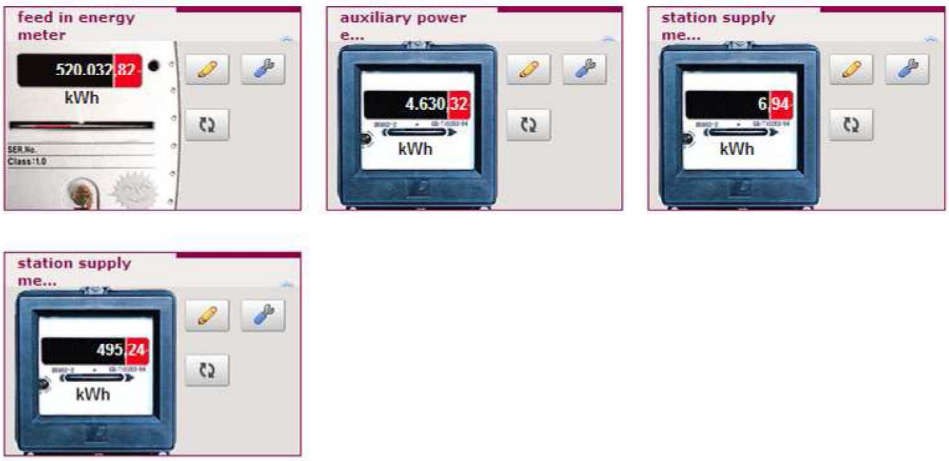
Temperatur WR E1-4	teplota střídačů WR E1-4
Mittelwert Einheit	střední hodnota
Maximalwert Einheit	maximální hodnota



Graf č. 8 Měření absolutního proudu jednotlivých stolů, převzato z [18].

Graf zobrazuje průběh a rozdíly ve výrobě mezi jednotlivými stoly, tedy soustavou sérioparalelně zapojených modulů. Levý červený sloupec je hodnota proudu v Ampérech.

E1.0 S1 – 1 až E3.0 S2 left 6 je označení stolů – jednotlivých na sobě nezávislých sekcí. Rozdíly v hodnotě proudu mezi jednotlivý stoly jsou způsobeny nejenom výrobní tolerancí střídačů, ale hlavně nestejným počtem modulů propojených ve stolech, případně rozdílným zastíněním, pokud jsou moduly pokryty sněhem nebo ledem. Měření bylo prováděno v zimních měsících.



Obr. č. 14 Ukázka grafického zobrazení odečítaných hodnot z měřících hodin osazených ve fotovoltaické elektrárně v software SMA®, převzato z [18].

4. Praktické měření

4.1 Provedení konkrétního měření některých parametrů solárních panelů

Pro měření byl zvolen solární panel dodávaný firmou Conrad elektronic® o udávaném výkonu 13W, typové označení TPS 936A™. Jedná se o monokrystalický panel určený k dobíjení 12V baterií, vhodný pro venkovní instalaci, vybavený blokovací diodou k zabránění procházení zpětného proudu z baterie.

Udávaná technická data:

Napětí naprázdno	17,5 V
Výstupní proud	0,74 A
Rozměry (š × v × h)	390 × 520 × 35 mm

K měření byly dále použity následující přístroje:

Multimetr Solid RE830B® pro měření napětí

Měřící přístroj ERA UM 4B® pro měření proudu

Digitální luxmetr MS – 1300® pro měření intenzity osvětlení

Zátěž žárovka 12V/5W

Osvětlovací lampa o příkonu 2 × 300 W

Intenzita osvětlení je definovaná jako světelný tok dopadající na určitou plochu. Je tedy podílem světelného toku [lm] a plochy [m^2] [4, 5]

Značí se *E*, jednotkou je Lux [lx]

$$E = \frac{d\Phi}{dA}, \tag{7}$$

$$E = \frac{\Phi}{S}, \tag{8}$$

Pro bodový zdroj o svítivosti *I* [Cd] a paprsků dopadajících pod úhlem α [°] k normále plochy, vzdálené od zdroje *r* [m], pak platí [4, 5]

$$E = \frac{I}{r^2}\cos\alpha \tag{9}$$

Svítivost udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. Svítivost lzc určit pouzc pro bodový zdroj, tj. pro zdroj, jchož rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu. [4, 5]

Pro měření byl zvolen úhel α = 0°, tedy fotočlánek i měřící přístroj byl natočen kolmo ke zdroji světla.

Zjišťovaným parametrem byl výkon článku P [W] vypočítaný z naměřených hodnot napětí U [V] a proudu I [A] podle vztahu [4, 5]

$$P = U.I \tag{10}$$

Měření bylo prováděno při teplotě 10 °C.

Postup měření:

Článck byl umístčn v místnosti, kdc byla jcdiným zdrojcm svčtla lampa připojená na rozvodnou síť 230 V o příkonu 2 × 300 W. Touto lampou byl článek osvětlován v ose kolmé na jeho plochu. Luxmetr byl umístěn ve středu mezi dvěma

polovinami fotovoltaického panelu tak, aby článek nezakrýval. Výstup článku byl připojen na zátěž (žárovka 12V/5W) a v sérii zapojen ampérmetr. Napětí bylo měřeno na patici připojené žárovky.

Změna intenzity osvětlení byla prováděna změnou vzdálenosti zdroje světla od fotočlánku. Nejvyšší výkon, uvedený v tabulce č. 1, byl naměřen ve vzdálenosti 0,3 m, nejnižší naměřené hodnotě 500 lx odpovídala vzdálenost 3,3 m.

Pro nejvyšší hodnoty osvětlení bylo obtížné nastavit přesnou hodnotu osvětlení změnou vzdálenosti fotovoltaického článku od zdroje světla, což je experimentální potvrzení vztahu (3), kdy hodnota osvětlení je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti.

Vyšších hodnot výkonu článku nebylo možné s daným zdrojem světla dosáhnout. Zdroj o vyšší intenzitě nebyl pro měření k dispozici a při zmenšení vzdálenosti zdroje světla a fotočlánku by došlo ke zkreslení výsledků měření v důsledku nerovnoměrného dopadu světla na plochu článku. Článek by se také od použitého světelného zdroje při malé vzdálenosti příliš zahříval.

V době, kdy byl k dispozici vhodný fotočlánek a potřebné měřící přístroje bohužel nebyl žádný jasný slunečný den s dostatečnou intenzitou slunečního světla. Měření tedy bylo provedeno s umělým zdrojem světla.

Na grafu č. 9 je zachycen průběh hodnoty výkonu článku v závislosti na osvětlení při prováděném měření.

4.2 Naměřené hodnoty

Tabulka č. 1

Osvětlení [lx]	Napětí [mV]	Proud [mA]	Výkon článku [mW]
0	0,0	0,0	0,000
500	4,0	5,0	0,020
1 000	8,0	10,0	0,080
1 500	12,0	15,0	0,180
2 000	15,0	19,0	0,285
2 500	18,0	22,0	0,396
3 000	20,0	26,0	0,520
3 500	23,0	29,0	0,667
4 000	26,0	33,0	0,858
4 500	29,0	35,0	1,015
5 000	31,0	38,0	1,178
5 500	34,0	41,0	1,394
6 000	36,0	44,0	1,584
6 500	38,0	46,0	1,748
7 000	40,0	48,0	1,920
7 500	43,0	51,0	2,193
8 000	45,0	54,0	2,430
8 500	47,0	58,0	2,726
9 000	48,0	60,0	2,880
9 500	52,0	65,0	3,380
10 000	54,0	68,0	3,672
10 500	56,0	69,0	3,864
11 000	57,0	70,0	3,990
11 500	61,0	74,0	4,514
12 000	61,0	75,0	4,575
12 500	64,0	79,0	5,056
13 000	65,0	80,0	5,200
13 500	67,0	81,0	5,427
14 000	71,0	85,0	6,035
14 500	74,0	86,0	6,364
15 000	78,0	90,0	7,020

Graf č. 9

Obr. č. 15 Měřený 13W fotočlánek, foto autor

4.3 Porovnání naměřených údajů s údaji udávanými výrobci

Článek pravděpodobně deklarované hodnoty výkonu 13 W dosahuje pouze v ideálních podmínkách, tedy za jasného slunečného dne. Při osvětlení difúzním světlem výkon fotočlánku výrazně klesá.

5. Závěr

Při srovnání hodnot dosažených kadmium-teluridovými články (CdTe) použitých ve fotovoltaické elektrárně, jejíž některé parametry jsou uvedeny výše, je vidět hlavní rozdíl v závislosti na přímém slunečním osvětlení, kdy CdTe články dodávají energii i při difúzním rozptýleném světle, kdežto měřený křemíkový článek dodává při difúzním světle pouze zanedbatelný výkon k poměru k deklarovanému 13 wattovému výkonu (řádově hodnoty jednotek miliwattů).

V zeměpisných šířkách České republiky se ukazují jako výhodnější fotočlánky založené například na technologii výše zmiňované CdTe oproti zatím nejrozšířenějším křemíkovým fotočlánkům. Samozřejmě, že záleží v jaké konkrétní lokalitě je článků využíváno. Zobrazení průměrného ročního úhrnu globálního záření je na obr. č. 13.

Ze závěru provedeného měření vyplývá, že k nahrazení zdroje denního světla by bylo třeba umělého zdroje světla s vysokým příkonem. S použitou lampou o příkonu 2 × 300 W bylo možné dosáhnout hodnoty osvětlení maximálně 15 000 lx. Pro porovnání je maximální udávaný osvit pro podmínky České republiky za ideálních podmínek 70 000 lx. [2]

V této bakalářské práci bylo provedeno popsání fyzikálních principů fotovoltaických článků, seznámení se solárními články používanými v energetice, vysvětlení měření, která se provádějí na solárních článcích a provedeno praktické měření parametrů konkrétního článku o výkonu 13W, typové označení TPS 936A™, a to metodou popsanou v čl. 4.1. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky č. 1 a graficky znázorněny v grafu č. 9.

6. Použitá literatura

[1] PROFIT SOLAR s.r.o. <http://www.profitsolar.cz/o-solarni-energii.php>, 25.1.2010

[2] Czech RE Agency - Fotovoltaika pro každého < http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>, 25.1.2010

[3] EkoWATT :: Informace :: Obnovitelné zdroje energie <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie>, 25.1.2010

[4] KITTEL, Ch. Úvod do fyziky pevných látek. Praha: Academia, 1985.

[5] SVOBODA, M. a kol. Fyzika pevných látek I. a II. (pro učitelské studium), Praha: MFF UK, 1986.

[6] LAUE, M. von Dějiny fyziky. Praha: Orbis, 1959.

[7] SODOMKA, L, SODOMKOVÁ, M Nobelovy ceny za fyziku, Praha: SET OUT, 1997. ISBN 80-902058-5-2.

[8] CELÝ, J. Základy kvantové mechaniky pro chemiky I (principy) II. (aplikace). Brno: UJEP, 1986

[9] OHL, R <http://www.pbs.org/transistor/album1/ohl/index.html>, 6.12.2009

[10] Light-sensitive electric device - Patent 2402662 <http://www.freepatentsonline.com/2402662.html>, 25.1.2010

[11] Příměrový polovodič <http://www.vossost.cz/svab/elektross/soucastky/jeden_prechod/primes_polovodic.html>, 25.1.2010

[12] Druhy fotovoltaických panelů - monokrystalické a polykrystalické fotovoltaické panely | GS Energy <http://www.gs-energy.cz/solarni-panely-ceeg>, 25.1.2010

[13] Solární systémy - komponenty <http://www.coin-cz.cz/solarni-systemy-komponenty.php>, 25.1.2010

[14] juwi s.r.o. <http://www.juwi.cz/fotovoltaika/fve-morasice/>, 25.1.2010

[15] juwi s.r.o. <http://www.juwi.cz/fotovoltaika/fve-lukavice/>, 25.1.2010

[16] juwi s.r.o. <http://www.juwi.cz/fotovoltaika/fve-bohunovice/>, 25.1.2010

[17] ..:: Atlas podnebí České republiky ::.. < http://www.atlaspodnebi.cz/uvod.html>, 25.1.2010

[18] Firemní materiály společnosti JUWI s.r.o., které nejsou určeny ke zveřejnění

[19] com2003_0302en01.pdf (application/pdf objekt) <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2003/com2003_0302en01.pdf>, 25.1.2010

[20] Solartec - Nejekologičtější zdroj nevyčerpatelné energie <http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/nejekologictejsi-zdroj-energie.html>, 25.1.2010