

So 2 **Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt:**

So 3 **Sonne - Basisdaten für 100%-Szenarien**

So 4 Untersuchung zu Möglichkeiten und Grenzen der Energiegewinnung aus Solarstrahlung unter den Bedingungen von 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland.

So 5 Version: 110213

So 7 **1. Strahlungsintensität**

So 8 In Mitteleuropa liegt die Energie der Einstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche, bei ca. 1.000 kWh/m² im Jahr [75].

So 9 Abhängig von Breitengrad und klimatischen Bedingungen ist die Intensität regional unterschiedlich.

So 10 Die inzwischen in ganz Deutschland weit verbreiteten Photovoltaik-Anlagen, deren Betriebsdaten in großer Zahl im Internet verfügbar sind, können wegen des annähernd linearen Zusammenhangs zwischen Strahlung und gewonnener Energie als "Belichtungsmesser" betrachtet werden und bieten sich für die Ermittlung regionaler Strahlungsintensitäten an.

So 11 Um über Photovoltaik- hinaus auch solarthermische Anlagen bewerten zu können, ist es sinnvoll, die relative Strahlungsintensität zu bilden - aus dem Verhältnis der Solarstromerträge in der Zielregion zu einer Referenzregion.

So 12 Für die Wahl des Landkreises Konstanz als Referenzregion sprechen zwei Gründe: Erstens bietet die große Zahl der im sonnenverwöhnten Süden vorhandenen Photovoltaik-Anlagen eine breite statistische Basis und zweitens ist für diesen Landkreis eine Angabe zum erwartenden Ertrag solarthermischer Anlagen verfügbar.

So 13 Zur Bildung der relativen Strahlungsintensität wird ein Referenz-Stromertrag von 1047 kWh/kWp/a für den Landkreis Konstanz im Jahr 2007 angesetzt [86].

So 14 Der durchschnittliche Stromertrag in der gewünschten Zielregion ist jeweils der selben Quelle zu entnehmen durch Angabe des entsprechenden Postleitzahlengebiets und Auswahl des Jahres 2007.

So 15 Beispiele:

Der Landkreis Nienburg liegt im Postleitzahlbereich 30000-31999, für den der durchschnittliche Solarstromertrag im Jahr 2007 mit 898 kWh/kWpeak angegeben wird, das ergibt für diese Region eine relative Strahlungsintensität von 86 Prozent gegenüber der Referenzregion Landkreis Konstanz.

So 16 Der deutsche Schnitt liegt mit einem durchschnittlichen Stromertrag im Jahr 2007 von 967 kWh/kWpeak bei 92 Prozent der Referenzregion Landkreis Konstanz.

So 18 **2. Flächen**

So 19 Für solare Nutzung sind Dachflächen erste Wahl. Dafür sprechen die dezentrale, verbrauchernahe Energiegewinnung und die weitgehende Freiheit von Nutzungskonkurrenzen. Bevor andere Flächen beansprucht werden, sollten die von ihrer Ausrichtung her geeigneten Dachflächen voll genutzt werden.

So 20 Bisher sind nur für wenige Regionen entsprechende Daten verfügbar, deshalb wurde die Möglichkeit der Schätzung analog zu einer Referenzregion geschaffen.

So 21 Als Referenzregion dient auch hier der Landkreis Konstanz, da dort bereits im Jahr 2001 eine zahlenmäßige Abschätzung der solar geeigneten Dachflächen durchgeführt wurde ([82], S. 41 ff.).

So 22 Danach sind auf den vorhandenen Flach- und Schrägdächern unter Berücksichtigung von Neigung, Südausrichtung, baulichen Hindernissen und Verschattung geeignete Flächen für 256 Hektar Solarkollektoren oder Photovoltaik-Module vorhanden.

So 23 Bezogen auf die 6.393 Hektar Gebäude- und Freiflächen im Landkreis Konstanz ([89], Tabelle 449-01-4, 2004) ergibt sich ein solar geeigneter Dachflächenanteil von 4,0 Prozent.

- So 24 Unter der Annahme, dass in den meisten Landkreisen Art und Dichte der Bebauung ähnlich und damit der Anteil solar geeigneter Dachflächen an den Gebäude- und Freiflächen in erster Näherung vergleichbar ist, kann der Wert vom Landkreis Konstanz als Schätzgrundlage für die jeweilige Zielregion dienen.
- So 25 Zum Vergleich: Kaltschmitt gibt ein solares Dachflächenpotenzial von 838 Millionen Quadratmeter auf Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland unter Berücksichtigung der gegebenen bau- und solartechnischen Restriktionen an ([81], S. 193), das entspricht einer Fläche von 83.800 Hektar.
- So 26 Bezogen auf die 2.393.839 Hektar Gebäude- und Freiflächen in Deutschland ([89], Tabelle 449-01-4, 2004) ergibt sich ein solar geeigneter Dachflächenanteil von 3,5 Prozent.
- So 27 Da hier auch die Ballungszentren mit eher geringeren Möglichkeiten für Solarnutzung berücksichtigt sind und die Fassadenflächen außer Acht gelassen wurden, erscheint der Referenzwert vom Landkreis Konstanz als angemessen.
- So 29 Wegen der größeren Leitungsverluste beim Wärme- gegenüber Stromtransport empfiehlt es sich, auf Wohngebäuden vorrangig thermische Solarkollektoren vorzusehen, während Photovoltaik-Anlagen eher auf Gewerbegebäuden ohne nennenswerte Wärmeabnahme zu platzieren sind.
- So 30 Auf welchen Anteil an den solar geeigneten Dachflächen man jeweils für Wärme- und für Stromgewinnung abzielt, ist frei wählbar - in einer Studie für den Landkreis Konstanz beispielsweise wurde 50% für Wärme angesetzt -
- So 31 für Strom ebenfalls 50% ([83], S. 46).
- So 33 Bei Bedarf über die verfügbaren Dachflächen hinaus können zusätzlich Freiflächen belegt werden, dabei sind allerdings mögliche Nutzungskonflikte zu beachten.
- So 34 Im Fall der Solarenergie werden aus praktischen Erwägungen als Bezugsmaß die geeigneten Kollektor- bzw. Modulflächen angegeben, während bei den übrigen Energiequellen die horizontale Bodenfläche als Bezug dient.
- So 35 Bei Freiflächen ist zu beachten, dass die wegen der Abschattungs-Abstände tatsächlich beanspruchte Bodenfläche etwa dreimal so groß ist, wie die eigentliche Modulfläche - das ist im Regelfall unerheblich, solange die Solarflächen nur wenige Prozent der gesamten Freifläche einnehmen.
- So 36 Empfohlen wird daher, nicht mehr solare Freiflächen anzusetzen, als solar geeignete Dachflächen vorhanden sind [24].
- So 38 **3. Technologien**
- So 39 Zwei Technologien zur direkten Energiegewinnung aus Solarstrahlung sind in Deutschland vorherrschend und sicher auch künftig von Bedeutung: Solarkollektoren für Wärme und Photovoltaikmodule für Strom.
- So 40 Für andere Technologien sind aus heutiger Sicht in Deutschland kaum nennenswerte Anteile zu erwarten, 'Concentrating Solar Thermal Power Plants' (CSP) beispielsweise sind nur bei einer wesentlich höheren Sonnenstundenzahl sinnvoll.
- So 42 **3.1. Thermische Solarkollektoren**
- So 43 Kaltschmitt gibt für Kollektoranlagen mit derzeit mittleren Kollektorenergieerträgen und Systemnutzungsgraden durchschnittlich erreichbare Energieerträge zwischen 600 und 1200 MJ, bei einem Umrechnungsfaktor von 0,278 kWh pro MJ entsprechend 166,8 - 333,6 kWh pro Quadratmeter und Jahr an ([81], S. 193).
- So 44 Unter Berufung auf eine Publikation des Öko-Instituts Freiburg wird für den Landkreis Konstanz mit einem jährlichen Wärmeertrag von 400 kWh pro Quadratmeter Kollektorfläche gerechnet ([83], S. 46), das entspricht 4000 MWh pro Hektar.
- So 45 Selbst wenn diese Annahme zurzeit vielleicht noch etwas zu optimistisch ist, erscheint sie für die Zukunft aufgrund zu erwartender technischer Fortschritte durchaus als realistisch.

So 46 Demnach wird auch für die Zukunft als jährlicher Referenzertrag für den Landkreis Konstanz 4.000 MWh pro Hektar Kollektorfläche und ein deutscher Durchschnittsertrag von 3.694 MWh pro Hektar angesetzt.

So 47 Dabei wird angenommen, dass das Nachfragepotenzial dem Angebotspotenzial entspricht und somit nichts von dem möglichen Ertrag verschenkt wird - dies lässt sich durch entsprechend dimensionierte Saison-Wärmespeicher erreichen.

So 49 **3.2. Photovoltaik**

So 50 Kaltschmitt geht bei seinen Potenzialbetrachtungen für Deutschland mit 'derzeit besseren' monokristallinen Solarmodulen von einem jährlichen Energieertrag von 1.181 MWh pro Hektar aus (errechnet nach Angaben in [81], S. 272-273: Technisches Angebotspotenzial 99 TWh bei einer Modulfläche von 838 Millionen Quadratmeter).

So 51 Mit weniger materialaufwändigen amorphen Solarmodulen würden nach der selben Quelle nur 537 MWh pro Hektar entsprechend 45,5 Prozent des Energieertrages erreicht werden können (Technisches Angebotspotenzial 45 TWh).

So 52 Wegen der heute weitaus größeren Verbreitung kristalliner Module werden hier nur diese eingehender betrachtet, beliebige Anteile amorpher Module lassen sich bei Bedarf über die obige Prozentangabe einführen.

So 53 Müller war bei der Potenzialstudie für den Landkreis Konstanz von einem spezifischen Flächenbedarf von 8 Quadratmetern pro kW Peak ausgegangen ([83], S. 42).

So 54 Aus den Angaben von Kaltschmitt lässt sich schließen, dass er inzwischen von einem spezifischen Flächenbedarf von 7,2 Quadratmeter pro Kilowatt Peak ausgeht ([81], Seite 272-273, errechnet aus 838 Millionen Quadratmetern Modulfläche bei einer installierten Leistung von 116 GW).

So 55 Dies dürfte dem gesteigerten Wirkungsgrad der Solaranlagen geschuldet sein, so dass für die Zukunft auf jeden Fall von diesem Wert ausgegangen werden kann, wobei die Möglichkeit weiterer Technologie-Fortschritte vorsichtshalber unberücksichtigt bleibt.

So 56 Mit einem durchschnittlichen jährlichen Stromertrag von 1047 kWh pro kW Peak im Landkreis Konstanz ([86], Jahr 2007) ergibt sich daraus ein flächenbezogener Referenz-Energieertrag von 1.449 MWh pro Hektar und Jahr (ist über das Verhältnis der Solarstromerträge an die Zielregion anzupassen, siehe [13] ff.).

So 57 Für den heutigen Anlagenbestand wird gemäß Müller ein höherer spezifischer Flächenbedarf von 8 Quadratmetern pro kW Peak angenommen, woraus sich für den Referenz-Landkreis Konstanz ein Energieertrag von 1.309 und im deutschen Durchschnitt von 1.209 MWh pro Hektar und Jahr ergibt (ist über das Verhältnis der Solarstromerträge an die Zielregion anzupassen, siehe [13] ff.).

So 59 **4. Nutzungs-Status**

So 60 Zu den bereits heute mit thermischen Solar- und PV-Anlagen belegten Dachflächen ist die Datenlage meist dünn. Falls die Installierte Leistung oder Einspeisung von PV-Anlagen bekannt ist, wird die Abschätzung der belegten Fläche vorgenommen (über 8m²/kWp und über 850 kWh/kWp) und automatisch angesetzt.

Wenn für Solarwärme oder PV keine Werte für die Region verfügbar sind, wird automatisch der deutsche Durchschnittswert für solar genutzte Flächen angesetzt. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der größte Teil der bisherigen Solaranlagen sich auf Dächern befinden.

So 62 3.700 GWh Wärme und 3.500 GWh Strom wurden in Deutschland 2007 laut einer Publikation des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aus Solarstrahlung gewonnen (siehe Anhang B: Erneuerbare Energien Deutschland 2007, [78]).

So 63 Mit dem Energieertrag für Solarthermie von 3.694 MWh/ha/a [46] war in Deutschland 2007 eine Fläche von 1002 Hektar belegt, das entspricht einem Anteil von 0,042 Prozent an den Gebäude- und Freiflächen [26].

So 64 Photovoltaik mit einem durchschnittlichen Energieertrag von 1.209 MWh/ha/a [57] nahm eine Fläche von 2.896 Hektar ein, entsprechend 0,121 Prozent der Gebäude und Freiflächen.

- So 65 Unter der Annahme, dass im Jahr 2007 der Anteil der Freiflächenanlagen noch vernachlässigbar war, wurden somit in Deutschland 3.897 Hektar Dachflächen solar genutzt, und zwar zu 25,7 Prozent für Solarwärme.
- So 66 74,3 Prozent der Dachflächen wurden für die Stromgewinnung genutzt.
- So 67 2007 wurden demnach insgesamt 0,163 Prozent der Gebäude- und Freiflächen solar genutzt, das sind erst 4,1 Prozent der geeigneten Dachflächen [23].
- So 68 Aus technologischer Sicht und vom Flächenangebot her steht dem forcierten Ausbau der Solarwärme- und Solarstromgewinnung nichts im Wege.
- So 69 Entscheidend für den Durchbruch vom Nischenprodukt zu einer Hauptsäule der Energieversorgung ist allerdings die Schaffung ausreichender Speicher- und Regelkapazitäten.

So 71 5. Anhang

So 72 [Anhang A: Wertetabelle](#)

So 73 [Anhang B: Erneuerbare Energien Deutschland 2007](#)

So 74

6. Endnoten

So 75 BINE Informationsdienst; "Basisinfo 3 - Photovoltaik"; 12.2007.

So 76 <http://www.bine.info/hauptnavigation/publikationen/basisenergie/publikation/photovoltaik/>

So 78 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; "Erneuerbare Energien in Zahlen"; 6.6.2009.

So 79 http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf

So 81 Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Streicher, Dr.-Ing. Andreas Wiese; "Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte", 2006.

So 83 Bene Müller, solarcomplex GmbH; "Erneuerbare Energien in der Region Hegau / Bodensee - Übersicht der technisch verfügbaren Potentiale"; 2001.

So 84 <http://www.solarcomplex.de/info/service/download.php>

So 86 Solarförderverein e. V.; "Bundesweite monatliche Stromertragsdaten von PV-Anlagen".

So 87 http://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region_uebersichten_auswahl.pl/gr

So 89 Statistische Ämter des Bundes und der Länder; "Regionaldatenbank Deutschland".

So 90 <https://www.regionalstatistik.de/genesis/>

Anhang A: Wertetabelle

Bedeutung	räumlich	zeitlich	Textbezug	Einheit	Basis/Status	Ziel
Sonne - Basisdaten für 100%-Szenarien			So3	Version:	110213	
Intensität:						
Solarstrom-Ertrag in Referenzregion Landkreis Konstanz als Bezugsmaß für die Strahlungsintensität	Refreg.	2007	So13	kWh/a/kWp	1,047	
Umfang:						
Bereits solar genutzte Flächen an Gebäude- & Freiflächen	Zielreg.	2007	So60	Hektar		
Anteil bereits solar genutzter Flächen an Gebäude- & Freiflächen in Deutschland	Refreg.	2007	So67	Prozent	0,163	
Anteil Solar-geeigneter Dachflächen an Gebäude- und Freiflächen, Beispiel Landkreis Konstanz	Refreg.	Zielzeit	So23	Prozent		4,0
Ansatz für Anteil solar-geeigneter Dachflächen an Gebäude- & Freiflächen	Zielreg.	Zielzeit	So24	Prozent		
Ansatz für solar genutzte Freiflächen bezogen auf Gebäude- & Freiflächen	Zielreg.	Zielzeit	So36			
Flächenanteil Wärmegewinnung an gesamter Solarnutzung auf deutschen Dächern	Refreg.	2007	So65	Prozent	25,7	
Beispielansatz für Flächenanteil Wärmegewinnung in Potenzialstudie für den Landkreis Konstanz	Refreg.	Zielzeit	So30	Prozent		50
Flächenanteil Stromgewinnung an gesamter Solarnutzung auf deutschen Dächern	Refreg.	2007	So66	Prozent	74,3	
Beispielansatz für Flächenanteil Stromgewinnung in Potenzialstudie für den Landkreis Konstanz	Refreg.	Zielzeit	So31	Prozent		50
Leistung:						
Energieertrag Solarwärme in Referenzregion Landkreis Konstanz	Refreg.	2007	So44	MWh/ha/a	4.000	
	Refreg.	Zielzeit	So46	MWh/ha/a		4.000
Energieertrag Photovoltaik in Referenzregion Landkreis Konstanz	Refreg.	2007	So57	MWh/ha/a	1.309	
	Refreg.	Zielzeit	So56	MWh/ha/a		1.449

Anhang B: Erneuerbare Energien Deutschland 2007

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 06. Juni 2008: Erneuerbare Energien in Zahlen http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf S. 14							
Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energiebereitstellung in Deutschland 2007							
	End-energie	Primärenergie-äquivalent		Anteil am Stromverbrauch 8)	Anteil am Endenergieverbrauch	Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch	
		nach Wirkungsgradmethode	nach Substitutionsmethode			nach Wirkungsgradmethode	nach Substitutionsmethode
	[GWh]	[PJ]	[PJ]		[%]	[%]	[%]
Wasserkraft 2)	20.700	74,5	203,6	Anteil am Stromverbrauch 8)	3,4	0,5	1,4
Windenergie	39.500	142,2	374,8		6,4	1	2,6
Photovoltaik	3.500	12,6	31,1		0,6	0,1	0,2
biogene Festbrennstoffe	7.390	65,5	65,5		1,2	0,5	0,5
biogene flüssige Brennstoffe	2.590	22,9	22,9		0,4	0,2	0,2
Biogas	7.430	65,8	65,8		1,2	0,5	0,5
Klärgas	1.040	9,2	9,2		0,2	0,1	0,1
Deponiegas	1.050	9,3	9,3		0,2	0,1	0,1
biogener Anteil des Abfalls 3)	4.250	37,7	37,7		0,7	0,3	0,3
Geothermie 4)	0,4	0	0		0	0	0
Summe	87.450	439,7	820		14,2	3,2	5,8
biogene Festbrennstoffe (Haushalte)	57.778		208	Anteil am EEV für Wärme 9)	4,2	1,5	1,5
biogene Festbrennstoffe (Industrie) 5)	11.250		40,5		0,8	0,3	0,3
biogene Festbrennstoffe (Heizkraft und Heizwerk)	2.300		8,3		0,2	0,06	0,06
biogene flüssige Brennstoffe 7)	4.500		16,2		0,3	0,12	0,11
biogene gasförmige Brennstoffe 7)	3.461		12,5		0,3	0,09	0,09
biogener Anteil des Abfalls 3)	4.910		17,7		0,4	0,13	0,12
Solarthermie	3.700		13,3		0,3	0,1	0,09
tiefe Geothermie	160		0,6		0,01	0,004	0,004
oberflächennahe Geothermie	2.139		7,7		0,2	0,05	0,04
Summe	90.198		324,7		6,6	2,3	2,3
Biodiesel	34.389		123,8	Anteil am Kraftstoffverbrauch 10)	5,6	0,9	0,9
Pflanzenöl	8.750		31,5		1,4	0,2	0,2
Bioethanol	3.417		12,3		0,6	0,1	0,09
Summe	46.556		167,6		7,6	1,2	1,2
gesamt	224.204	932,1	1.312,30	EEV 11)	8,6	6,7	9,2

Die derzeit gültige Methode zur Berechnung des Primärenergieäquivalents von Strom aus erneuerbaren Energien ist die Wirkungsgradmethode. Die Substitutionsmethode, die beispielsweise bei der Berechnung der durch erneuerbare Energien vermiedenen Emissionen und Brennstoffeinsätze angewandt wird, ist hier zusätzlich dargestellt.

Abweichungen in den Summen durch Rundungen; PEV, 13.878 PJ, Stand Februar 2008;

1) Erläuterung der Methoden zur Bestimmung des Primärenergieäquivalents siehe Anhang Abs. 4, bei Wärme und Kraftstoff wird hier Endenergie gleich Primärenergie gesetzt

2) bei Pumpspeicherkraftwerken nur Stromerzeugung aus natürlichem Zufluss

3) biogener Anteil mit 50 % angesetzt

4) zweites Geothermiekraftwerk Ende 2008 in Betrieb gegangen

5) Industrie = Betriebe des Bergbaus, der Gewinnung von Steinen und Erden sowie des verarbeitenden Gewerbes, § 8 Energiestatistikgesetz, Wert 2007 geschätzt auf der Basis von Angaben

6) nach §§ 3 und 5, Energiestatistikgesetz, nur Allg. Versorgung

7) teilweise geschätzt, bei Gasen einschließlich der Direktnutzung von Klärgas

8) bezogen auf den Bruttostromverbrauch 2007 von 617,5 TWh

9) wegen des milden Klimas 2007 nur 4.950 PJ als EEV eingesetzt. Basis für die Schätzung ist der EEV für Raumwärme, Warmwasser und sonstige Prozesswärme 2005 (unter der Berücksichtigung von Auf- und Abbau an Vorräten lagerbarer Brennstoffe – bereinigte Version) von 186,5 Mio. t SKE oder 5.466 PJ

10) bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch 2007 von 2.203 PJ

11) bezogen auf EEV 2006 von 9.423 PJ

12) bei einem Substitutionsfaktor (für Strom aus Biomasse) von 8.860 kJ/kWh, siehe Anhang Abs. 4

Zur Stromerzeugung aus Photovoltaik und zur Wärmebereitstellung aus Solarthermie siehe Anhang Abs. 5.

Quellen: BMU auf Basis AGEE-Stat sowie ZSW [3]; BSW [10]; AGEb [1], [11], [15], [18]; StBA [5]; ISI [41]; VDN [9]; IE [70]; VDEW [71]; [74]; Erdwärme-Kraft [79]; BAFA [83]