

Die optimale Ausrichtung des Sonnenkollektors im Raum Zürich

Einleitung

In der jüngsten Vergangenheit hat das Interesse für Fragen der Sonnenenergie stark zugenommen. Grundlegende Probleme bei Sonnenenergiekollektoren sind:

1. Welches ist die optimale Orientierung des Kollektors?
2. Wie gross ist die verfügbare Energie?

Der vorliegende Artikel möchte diese Fragen für Flachkollektoren beantworten.

Theorie

Das Studium der einfallenden kurzwelligigen Strahlung auf geneigten Flächen wurde Ende des 19. Jahrhunderts aufgenommen. Die Berechnung der direkten Sonnenstrahlung ist eine geometrische Aufgabe, die bereits vor der Jahrhundertwende gelöst werden konnte. Das einzige Problem war die Integration über die Zeit, die langwierige Berechnungen erfordert. Ohmura (1968) löste diese Aufgabe mit Hilfe von Vektoralgebra und numerischen Methoden. Die direkte Strahlung Q auf der Fläche mit Azimut A und Neigung B kann folgendermassen ausgedrückt werden:

$$Q = I_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 q^m \left[(X_1 \sin \rho \cos H - X_2 \sin H + X_3 \cos \rho \cos H) \cos \delta + (-X_1 \cos \rho + X_3 \sin \rho) \sin \delta \right] \quad 1.$$

wobei $X_1 = -\cos A \sin B$; $X_2 = \sin A \sin B$; $X_3 = \cos B$; $I_0 =$ Sonnenkonstante, $1,95 \text{ ly min}^{-1}$ oder $32,6 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; $r =$ Abstand Erde - Sonne; $r_0 =$ mittlerer Abstand Erde - Sonne; $q =$ Durchsichtigkeit der Atmosphäre für die Sonnenstrahlung; $\rho =$ geographische Breite; $\delta =$ Deklination der Sonne; $H =$ Stundenwinkel; m ist die optische Luftmasse, die, wenn die Sonnenhöhe grösser als 20° ist, durch die folgende Formel angenähert werden kann:

$$m = \frac{1}{\cos \rho \cos \delta \cos H + \sin \rho \sin \delta}$$

Für niedrigen Sonnenstand ist Tabelle 137 in Smithsonian Meteorological Tables (List, 1966) zu empfehlen.

Die Tagessumme der direkten Strahlung ist das Integral der Gl. 1 über H , von Sonnenaufgang bis

Sonnenuntergang auf der geneigten Fläche. Ein Intervall von 20 Minuten ist für die numerische Integration hinreichend. Die Genauigkeit des Resultats ist abhängig von jener der Schätzwerte der atmosphärischen Durchsichtigkeit q . Ohmuras Experiment (1969) zeigt, dass Gl. 1 für eine mit 20° gegen Süden geneigte Fläche einen mittleren quadratischen Fehler von 18 ly d^{-1} ergibt, was 7 % der tagestotalen direkten Strahlung entspricht.

Die mathematische Darstellung der diffusen Himmelsstrahlung für die geneigte Oberfläche wurde von Kondrat'yev (1965) entwickelt, unter der Annahme einer isotropischen und homogenen Himmelskuppel. Er gelangte zur Formel:

$$D_B = D_O \cos \frac{2B}{2} \quad 2.$$

D_B : diffuse Himmelsstrahlung auf der Neigung B

D_O : diffuse Himmelsstrahlung auf der horizontalen Fläche.

Die Formel von Kondrat'yev ergibt eine systematische Unterbewertung bei Südhängen und eine Ueberbewertung bei Nordhängen. Bei 20° Neigung beträgt diese Ueber- bzw. Unterbewertung etwa 8 % der Tageswerte.

Die geneigte Fläche empfängt normalerweise reflektierte diffuse Strahlung R_B aus der Umgebung. Diese Komponente wurde von Garnier und Ohmura (1970) folgendermassen dargestellt:

$$R_B = r G \sin \frac{2B}{2} \quad 3.$$

r : mittlere Reflektivität der Umgebung

G : Globalstrahlung auf der horizontalen Fläche.

Der Beitrag dieser Strahlungskomponente ist bedeutend kleiner als jener der anderen beiden.

Die totale einfallende kurzwellige Strahlung (Globalstrahlung) auf der geneigten Fläche ist die Summe der Gleichung 1, 2 und 3. Der mittlere quadratische Fehler bei einer mit 20° gegen Süden geneigten Fläche beträgt 8 % der mittleren täglichen Globalstrahlung.

Dr. Atsumu Ohmura, Geographisches Institut ETH, Sonneggstrasse 5, 8006 Zürich

Tab.1:

Monatsmittelstrahlung für Zürich-Kloten nach Schram und Thams (1970), ly d^{-1}													
Messjahre 1964-1967													
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahrestotal kly y^{-1}
direkte Strahlung	12	64	89	187	241	278	285	202	153	72	18	8	134
diffuse Himmelsstrahlung	58	82	132	171	206	220	216	191	139	95	56	46	134
globale Strahlung	70	146	221	358	447	498	501	393	292	167	74	54	268
reflektierte Strahlung (10% Albedo)	7	15	22	36	45	50	50	39	29	17	7	5	27
reflektierte Strahlung (50% Albedo)	35	73										27	

Tab.2:

Direkte, himmelsdiffuse, reflektierte diffuse und globale Strahlung auf die Südhänge für vier Jahreszeiten und ein Jahr, Einheit für Monatswerte in ly d^{-1} und Jahreswerte kly y^{-1}										
Neigung in Grad	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
<u>März</u>										
direkte Strahlung	89	106	120	130	136	138	136	130	120	106
himmelsdiffuse Strahlung	132	131	128	123	116	108	99	88	78	66
reflektierte diffuse Strahlung	0	0	1	2	3	4	6	7	9	11
globale Strahlung	221	237	249	255	255	250	241	225	207	183
<u>Juni</u>										
direkte Strahlung	278	287	288	280	265	242	212	177	137	95
himmelsdiffuse Strahlung	220	218	213	205	194	181	165	148	129	110
reflektierte diffuse Strahlung	0	0	2	3	6	9	13	16	21	25
globale Strahlung	498	505	503	488	465	432	390	341	287	230
<u>September</u>										
direkte Strahlung	153	182	206	224	234	238	234	224	206	182
himmelsdiffuse Strahlung	139	138	135	129	122	114	104	93	82	70
reflektierte diffuse Strahlung	0	0	1	2	4	5	7	10	12	15
globale Strahlung	292	320	345	355	360	357	345	327	300	267
<u>Dezember</u>										
direkte Strahlung	8	13	18	22	26	28	30	31	31	30
himmelsdiffuse Strahlung	46	46	45	43	41	38	35	31	27	23
reflektierte diffuse Strahlung (ohne Schneedecke)	0	0	0	0	1	1	2	2	2	3
reflektierte diffuse Strahlung (Schneedecke)	0	0	1	2	3	5	7	9	11	14
globale Strahlung ohne Schnee	54	59	63	65	68	67	67	64	60	56
globale Strahlung mit Schnee	54	59	64	67	70	71	72	71	69	67
<u>Jahressumme</u>										
globale Strahlung ohne Winterschnee	97	102	106	106	105	101	95	87	78	67
globale Strahlung mit Winterschnee	97	102	106	106	105	101	96	88	79	68

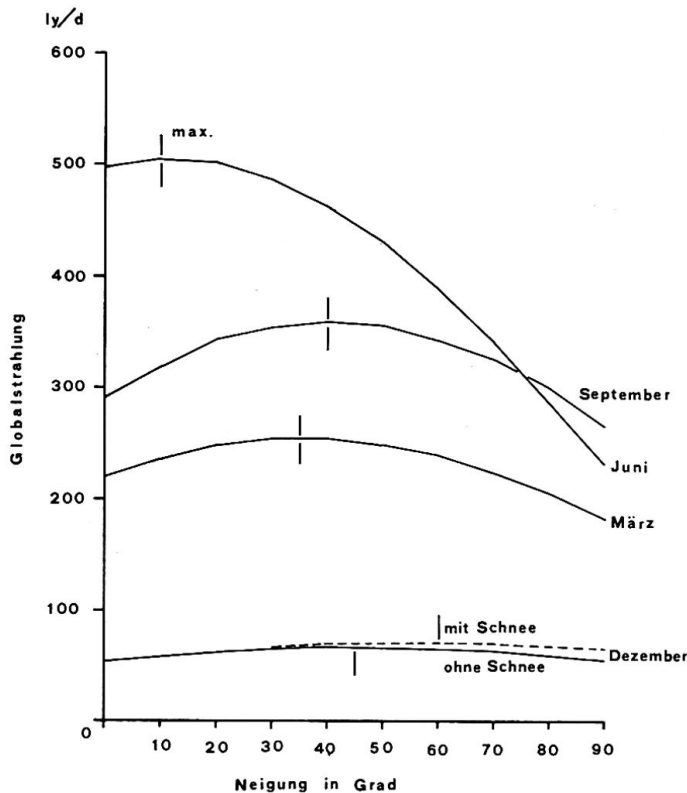


Fig.1: Monatsmittelglobalstrahlung auf den Südhängen im Gebiet Zürich

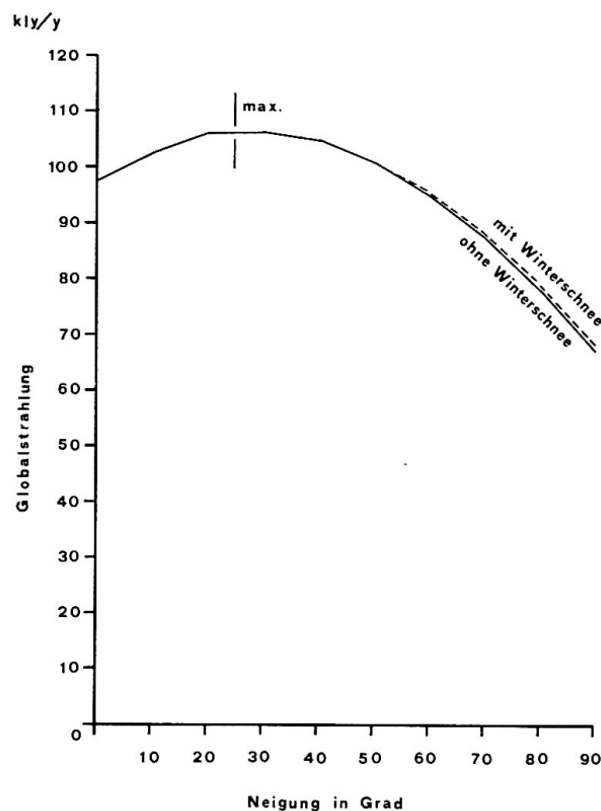


Fig.2: Jahrestotalglobalstrahlung auf den Südhängen im Gebiet Zürich

Klimatologische Daten

Die besten und zugleich die am leichtesten zugänglichen Daten sind jene von Schram und Thams (1970). Diese beiden Autoren fassten Strahlungsdaten für Zürich-Kloten aus 10 Jahren zusammen und verglichen sie mit den Messungen an der MZA in Zürich. Es zeigte sich, dass die Monatsmittel der Globalstrahlung der beiden Stationen identisch sind. Es ist deshalb gerechtfertigt, die Daten von Kloten auf Zürich anzuwenden. Die Klotener Daten haben den Vorteil, dass dort die Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung während vier Jahren gleichzeitig erfasst wurden, was für unsere Zwecke lang genug ist. Die Monatswerte der direkten, himmelsdiffusen und globalen Strahlung werden in Tabelle 1 gegeben.

Berechnung

In den gemässigten Breiten der Nordhemisphäre empfangen die Südhänge ($A = 180^\circ$) immer die grösste Globalstrahlung. Deshalb wurde Gl. 1 nur auf $A = 180^\circ$ angewendet. Für je 10° Neigung wird die Globalstrahlung für März, Juni, September und Dezember berechnet. Die Albedo der Umgebung wird mit 10 % angenommen, was für überbaute Gebiete ein vernünftiger Wert ist. Die Albedo der Schneedecke wird mit 50 % angenähert.

Ergebnisse

Die Resultate der Berechnung werden in Tabelle 2 und in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die optimale Neigung variiert mit der Jahreszeit, von 10° im Juni bis 40° zu 60° im Dezember. Die Neigungsabhängigkeit der Strahlung nimmt mit der Deklination stark ab. Die optimale feste Neigung von 25° ergibt eine jährliche Globalstrahlung von $106,2 \text{ kly y}^{-1}$ ($1231 \text{ kWh m}^{-2} \text{ y}^{-1}$)*, 9 kly (104 kWh m^{-2}) mehr als der horizontale Kollektor. Lässt man den Neigungswinkel mit der Jahreszeit optimal variieren, so gewinnt man dadurch bloss $2,3 \text{ kly}$ (27 kWh m^{-2}).

Oft ist die Neigung des Kollektors durch die Dachschräge gegeben. Ein nach Süden gerichtetes Dach mit der hierzulande üblichen Schräge von etwa 35° empfängt jährlich $105,5 \text{ kly}$ (1223 kWh m^{-2}), also fast den Maximalwert. Weicht das Azimut des Daches 45° von Süden ab, so muss mit einer Strahlungsreduktion von 6 kly y^{-1} ($70 \text{ kWh m}^{-2} \text{ y}^{-1}$) gerechnet werden.

* In der Schweiz beträgt der Energiebedarf pro Kopf ca. 9000 kWh pro Jahr. Unter der Annahme eines Falchkollektors mit 50 % Wirkungsgrad braucht man für diesen Bedarf 16 m^2 Kollektorfläche pro Person, oder eine solche von 100 km^2 für die Gesamtbevölkerung. Dies ist keine unrealistische Zahl.

Mein Dank richtet sich an Prof. Dr. F. Müller vom Geographischen Institut ETH, der mein Strahlungsstudium seit vielen Jahren unterstützt. Dankbar bin ich auch Herrn K. Scherler, der dieses Manuskript gelesen und lesbar gemacht hat.

Literatur

GARNIER, B.J. and OHMURA, A.: The Evaluation of Surface Variations of Short-wave Radiation Income, Solar Energy, Vol.13, 1970, pp.21-34.
KONDRAT'YEV, K.Ya.: Radiative Heat Exchange in the Atmosphere (übersetzt aus dem Russischen

von O. Tedder), Pergamon Press, Oxford and New York, 1965, p.332.
LIST, R.J.: Smithsonian Meteorological Tables, Smithsonian Misc. Coll., Vol.114, 6th Edn, 1966, pp.422.
OHMURA, A.: The Computation of Direct Insolation on a Slope, Climatological Bulletin, No.3, McGill University, Montreal, 1968, pp.42-53.
OHMURA, A.: Computation and Mapping the Short-wave Radiation on a Slope, M.Sc. Thesis, McGill University, Montreal, 1969
SCHRAM, K. und THAMS, J.C.: Die kurzweilige Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung auf dem Flugplatz Zürich-Kloten, Veröffentlichungen der Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt, Nr.16, 1970, S.18.

Literaturbesprechung

BOEGLI, Alfred: Karsthydrographie und physische Speläologie. 292 S., 160 Abb. und 12 Tafeln, Springer-Verlag, Berlin, 1978, ISBN 3-540-09015. DM 58,-

Höhlen und die Hydrographie der Karstgebiete sind zur Zeit ein sehr aktuelles Forschungsgebiet. Die Forschung wird aus unterschiedlichen Motiven betrieben. Auf der einen Seite sind es mehr sportlich orientierte Höhlenforscher, die in schwierigsten Befahrungen Sachverhalte über kaum zugängliche Höhlensysteme und ihre Hydrographie erkunden. Andererseits sind es an Problemen der wissenschaftlichen Grundlagen bis hin zu aktuellen Umweltfragen arbeitende Wissenschaftler, die den unterirdischen Karst untersuchen und denen es oft an Erfahrung vor Ort fehlt. Nur sehr wenige vereinen die Eigenschaften des aktiven Höhlenforschers mit der des Wissenschaftlers, wie dies bei A. BOEGLI der Fall ist. Seit nunmehr über 30 Jahren in Höhlen forschend, hat er eine Vielzahl von Einzelpublikationen über das Karstwasser, Lösungsvorgänge im Karst und Höhlen vorgelegt. Weiterhin wurden auf Fachtagungen neue Thesen zur Karsthydrographie und Speläologie vorgetragen. Diese zusammen fanden Eingang in das vorliegende Buch, das nicht nur bisherige Forschungsergebnisse in klarer sachlicher Art zusammenfasst und nur vorgetragene neue Theorien in naturwissenschaftlich abgesicherter Breite erstmals in fixierter Form vorlegt, sondern auch die gesamten Phänomene des unterirdischen Karstes behandelt. In einzelnen Kapiteln werden dargestellt:
Verkarstungsfähige Gesteine. - Lösungsvorgänge an verkarstungsfähigen Gesteinen, Korrosion. - Uebersicht über den Exokarst. - Endokarst und Karsthydrographie. - Physikalisches Verhalten der Karstwässer. - Die karsthydrographischen Zonen. - Karstwasser - Grundwasser. - Unterirdische Karstniveaus. - Karstquellen. - Markierungsstoffe. - Inkasion, - Speläomorphologie,

die Formenwelt der unterirdischen Abtragung. - Höhlensedimente. - Speläogenese. - Speläometeorologie. - Speläoklimatologie. - Eishöhlen. - Klassifikation der unterirdischen Hohlräume. - Höhlensignaturen.

Die Einführungskapitel über Petrographie und Exokarst sind sehr knapp gehalten, sie geben aber einen Ueberblick über den aktuellen Stand der Karstforschung. Die Lösungsvorgänge sind ausführlich dargestellt und Einzelprozesse methodisch sehr geschickt durch verständliche Abbildungen erläutert. Erfreulicherweise finden hierbei Forschungsergebnisse sowohl aus dem anglo-amerikanischen als auch aus dem französischen Sprachbereich Eingang. Vielleicht wäre es für den mit der physikalischen und chemischen Fachliteratur nicht so vertrauten Leser gut gewesen, einige Standardwerke anzuführen, um die Grundlagen für die dargelegten Kapitel leichter zu erarbeiten.

Die Stärke des Buches liegt aber in den Kapiteln über den unterirdischen Karst, seiner Höhlen und seiner Wässer. Hier zeigen sich einerseits die Erfahrungen von BOEGLI, andererseits tragen die guten Kontakte von BOEGLI zu anderen Höhlenforschern gute Früchte, da sonst kaum bekannte Sachverhalte eine weite Verbreitung finden und zur Unterstützung wissenschaftlicher Theorien dienen.

Die klare Darstellung und naturwissenschaftliche Untermauerung der Sachverhalte sowie deren Ableitung, verbunden mit methodisch sehr guten Dokumentationen, weist den Autor als erfahrenen Hochschullehrer aus. Das Buch ist ein Meilenstein der Karstforschung, es wird auf Jahre Grundlage für hydrographische und speläologische Untersuchungen sein und zu neuen Arbeiten anregen.

Es kann allen an der Karst- und Höhlenforschung interessierten - besonders den Geowissenschaftlern - nur empfohlen werden.

GH 3/79

Karl-Heinz Pfeffer, Köln