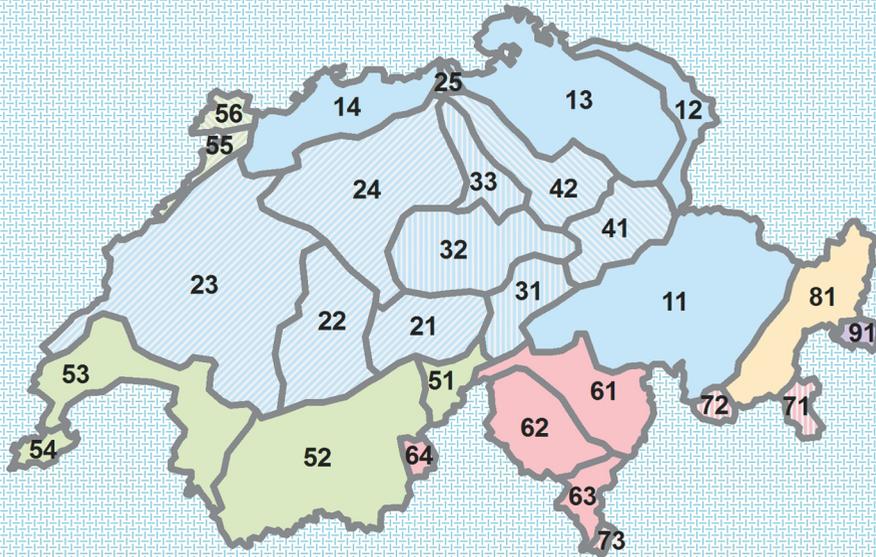


MAX BLATTER

ERNEUERBARE ENERGIEN IN DER SCHWEIZ



ENERGIE-ATLAS PUBLISHING
2018

MAX BLATTER

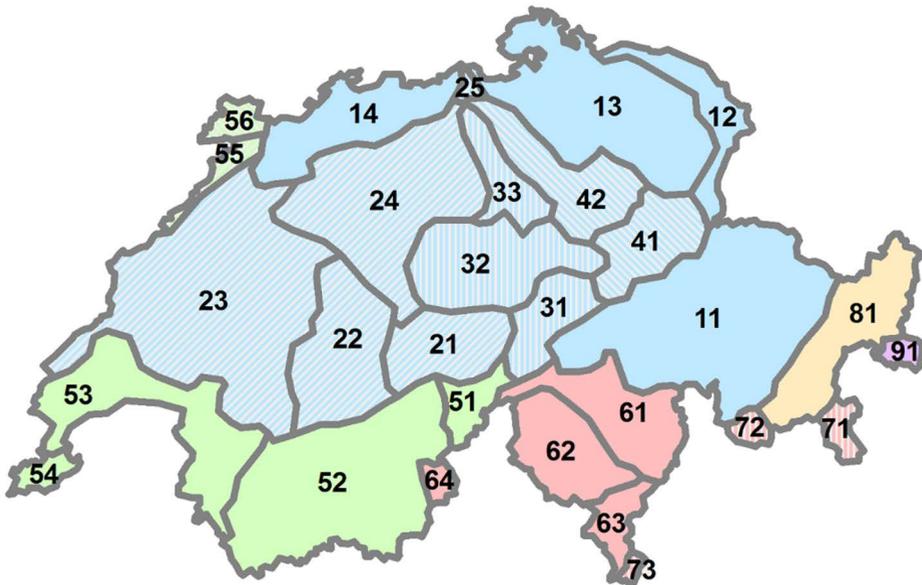
ERNEUERBARE ENERGIEN

IN DER SCHWEIZ

MAX BLATTER

ERNEUERBARE ENERGIEN

IN DER SCHWEIZ



ENERGIE-ATLAS PUBLISHING
2018

© 2018 Max Blatter, Energie-Atlas Publishing, CH-5620 Bremgarten (Aargau)

1. Auflage; Version: 20.12.2018

Herstellung und Verlag: BoD – [Books on Demand](#), DE-22848 Norderstedt

ISBN: 978-3-7481-4305-5

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Inhalt

Inhalt	5
Vorwort	9
1 Erneuerbare Primärenergieressourcen	13
1.1 Allgemeines	14
1.2 Direkt nutzbare Solarstrahlung	16
1.2.1 Meteorologische Daten: Globalstrahlung	16
1.2.2 Natürliches Energieangebot: Energie der Solarstrahlung	20
1.2.3 Geschätztes nutzbares Energieangebot	20
1.2.4 Zeitlicher Verlauf, Volatilität	21
1.3 Windenergie	25
1.3.1 Meteorologische Daten: Windgeschwindigkeit	25
1.3.2 Natürliches Energieangebot: Wind-Energieflussdichte	29
1.3.3 Geschätztes nutzbares Energieangebot	30
1.3.4 Zeitlicher Verlauf, Volatilität	32
1.4 Wasserkraft	34
1.4.1 Hydrologische Daten: Niederschlag und Abflussmengen	34
1.4.2 Natürliches Energieangebot: Wasserkraftpotenzial	35
1.4.3 Geschätztes nutzbares Energieangebot	38
1.4.4 Zeitlicher Verlauf, Volatilität	39
1.5 Geothermie	40
1.5.1 Geologische Daten: Wärmeflussdichte, Temperaturgradient	40
1.5.2 Natürliches Energieangebot: Wärmeenergie aus dem Boden	41
1.5.3 Geschätztes nutzbares Energieangebot	42
1.5.4 Zeitlich konstante Ressource	42

1.6	Umgebungswärme	43
1.6.1	Wärmequellen und deren Temperaturniveaus	43
1.6.2	Zeitlicher Verlauf	44
1.6.3	Oberflächennahe Umgebungswärme vs. Geothermie	47
1.7	Biomasse	48
1.7.1	Primärproduktion an Biomasse	48
1.7.2	Theoretisches und geschätztes nutzbares Energieangebot	48
1.7.3	Lagerfähige Ressource	50
1.8	Zusammenfassende Übersicht	51
2	Produktion erneuerbarer Endenergie	53
2.1	Allgemeines	54
2.1.1	Begriffe	54
2.1.2	Statistik der erneuerbaren Energien	56
2.2	Sonnenenergie	59
2.2.1	Fotovoltaik	59
2.2.2	Thermische Nutzung	62
2.3	Windenergie	66
2.4	Wasserkraftwerke	71
2.4.1	Flusskraftwerke	73
2.4.2	Speicherkraftwerke und Speicherseen	76
2.5	Geothermie	80
2.5.1	Elektrizitätsproduktion (Geothermiekraftwerke)	80
2.5.2	Thermische Nutzung ohne Wärmepumpe (tiefe Geothermie)	82
2.5.3	Thermische Nutzung mit Wärmepumpe (untiefe Geothermie)	83
2.6	Umgebungswärme	86
2.7	Biomasse	90

2.8	Abfall.....	93
2.9	Abwasserreinigung.....	95
3	Energie-Veredelung und -Verteilung.....	97
3.1	Einspeisung ins Elektrizitätsnetz.....	98
3.1.1	Struktur des Netzes.....	98
3.1.2	Dezentrale Kleinkraftwerke.....	100
3.2	Fernwärme-, Fernkälte- und Anergienetze.....	104
3.3	Einspeisung ins Erdgasnetz.....	107
3.3.1	Aufbereitung von Biogas, Klärgas u.ä.....	107
3.3.2	Power-to-Gas.....	107
3.4	Aufbereitung zu flüssigen Treibstoffen.....	109
3.4.1	Biodiesel.....	109
3.4.2	Bioethanol.....	109
3.4.3	Power-to-Liquid.....	110
3.5	Autarke Nutzung.....	111
3.5.1	PV-Anlagen abseits der Stromnetze.....	111
3.5.2	Biogasnutzung in der Landwirtschaft.....	112
3.5.3	Direkte Nutzung von Pflanzenöl als Treibstoff.....	112
4	Ausblick.....	113
4.1	Aktueller Ausbaugrad und Ausbaupotenzial.....	114
4.2	Forschung und Entwicklung.....	116
4.2.1	ETH, Universitäten, Fachhochschulen.....	116
4.2.2	Privatwirtschaftliche Forschung.....	119
4.2.3	Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm des BFE.....	120
4.3	Ausbildung „Energie und Umwelt“.....	121
4.3.1	Ausbildungsangebote.....	121

4.3.2	Auslagerung oder Integration des Themas?.....	122
4.3.3	Kooperation, Verdrängungskampf, Profilierung	124
4.3.4	Ausbildungsqualität	125
5	Werkzeugtasche.....	127
5.1	Abschätzen des nutzbaren Energieangebotes aus Solarstrahlung	128
5.2	Berechnung der Wind-Energieflussdichte.....	133
5.3	Abschätzen des Windenergie-Angebotes	135
5.3.1	„Tennisnetz“-Abschätzung	135
5.3.2	Abschätzung mit der klimatologischen Umwandlungsrate	138
5.3.3	Wertung der Resultate, „Wunschliste“	138
5.4	Physikalische Größen, Symbole und Einheiten.....	141
5.4.1	Griechisches Alphabet	141
5.4.2	Basiseinheiten	141
5.4.3	In der Energietechnik wichtige Größen und Einheiten.....	142
5.4.4	Zehnerpotenzen als Zusatz der Maßeinheiten.....	143
Anhang: Internet-Tools und Quellen.....		145
Schlagwortverzeichnis.....		160

Verweise in spitzen Klammern <Xxxxx> beziehen sich auf das Verzeichnis der Tools auf dem Internet (Anhang, S. 145), Verweise in eckigen Klammern [Xxxxx] auf das Quellenverzeichnis (Anhang, S. 146 ff). Folgt dem Verweis das Symbol @, so wird mit den dahinter stehenden Angaben auf eine bestimmte Stelle der Quelle verwiesen.

In Zahlen steht ein Punkt für das Dezimalzeichen, eine Leerstelle für das Tausender-Trennzeichen: 170 000 PJ/a ; $\pi = 3.141\ 592\ 653$

Vorwort

Das vorliegende Buch schließt eine Lücke, die der „Atlas der erneuerbaren Energien“ des gleichen Verfassers offen lässt: Beschäftigt sich jener mit den erneuerbaren Energien auf weltweiter Ebene, so will dieses Buch speziell auf die Gegebenheiten in der Schweiz eingehen.

Um Doppelspurigkeiten zu vermeiden, ist die Vermittlung technischer und physikalischer Grundlagen auf ein Minimum beschränkt worden. Für sie wird auf das ebenfalls neu erscheinende Buch „Erneuerbare Energien: Wissensbausteine“ (auch dieses vom gleichen Autor) verwiesen [Blatter ErnWissen].

Zu diesem Werk ist der Verfasser in erster Linie durch seine Unterrichtstätigkeit an der HF Uster (Höhere Bildung Uster HBU) inspiriert worden. Viele der dafür erarbeiteten Bausteine konnten hier in abgewandelter, überarbeiteter und teilweise aktualisierter Form übernommen werden. In diesem Zusammenhang geht ein herzlicher Dank an die Verantwortlichen der HF Uster, insbesondere den Bereichsleiter „Energie“, Alex Fuchs, die mir durch die Erteilung des Lehrauftrags „Energie Grundlagen“ diesen Weg öffneten.

Lernziele

Zwar wollen die Bücher des Verfassers keine Lehrbücher im engeren Sinne sein, sondern Fachbücher. Natürlich dienen sie auch der Wissensvermittlung, aber sie sind nicht primär darauf ausgerichtet oder gar nach didaktischen Kriterien aufgebaut. Gleichwohl hat sich der Verfasser entschieden, in seinen neu verfassten oder neu aufgelegten Werken die verfolgten Lernziele im Vorwort offenzulegen.

In der folgenden Tabelle geschieht dies, gegliedert nach den Kapiteln des Buches:

Thema	Kognitive Lernziele ¹⁾	Affektive Lernziele ²⁾
Erneuerbare Primärenergie-ressourcen	Die Leserinnen und Leser sollen das Potenzial der verschiedenen erneuerbaren Ressourcen in der Schweiz kennen und interpretieren können. (K1, K2, K3) ... selbstständig überschlägige Potenzialabschätzungen für gegebene Standorte durchführen können. (K3)	Die Leserinnen und Leser sollen ein Gefühl entwickeln für den Stellenwert der erneuerbaren Energieressourcen in der Schweiz. (A1, A2, A3) ... die verschiedenen Ressourcen in ihrer Rangordnung und bezüglich ihrer speziellen Eigenschaften einordnen können. (A3, A4, A5)
Produktion erneuerbarer Endenergie	Die Leserinnen und Leser sollen wissen, in welchem Ausmaß in der Schweiz die verschiedenen erneuerbaren Energien aktuell genutzt werden. (K1) ... in den Grundzügen verstehen, wie die entsprechenden Zahlen erhoben werden. (K2) ... die aktuellen Wachstumsraten bei der Nutzung der verschiedenen erneuerbaren Energien kennen und daraus künftige Entwicklungen abschätzen können. (K1, K2, K3, K5) ... wissen, wo sie später aktualisierte Zahlen finden. (K3)	Die Leserinnen und Leser sollen sich des zwar aktuell noch bescheidenen Ausmaßes, aber beeindruckenden Wachstums der Nutzung erneuerbarer Energien bewusst werden. (A1) ... erkennen, dass der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien Geduld und Beharrlichkeit erfordert, und aus dem erworbenen Wissen die Kraft dazu schöpfen. (A2)
Energie-Veredelung und -Verteilung	Die Leserinnen und Leser sollen die wichtigsten Möglichkeiten kennen, mit denen die gewonnene Endenergie den Verbraucherinnen und Verbrauchern zugänglich gemacht werden kann (Energieumwandlung, Verteilnetze aller Art). (K1)	Die Leserinnen und Leser sollen sich der Vielfalt der Möglichkeiten bewusst werden. (A1)

Thema	Kognitive Lernziele ¹⁾	Affektive Lernziele ²⁾
Ausblick	Die Leserinnen und Leser sollen die weitere Entwicklung beurteilen und eigene Beiträge dazu leisten können. (K5, K6) ... Die wichtigsten Forschungsinstitute und Ausbildungsanbieter kennen und weitere Informationen dazu abrufen können. (K1, K2, K3)	Die Leserinnen und Leser sollen Vertrauen in die Zukunft der erneuerbaren Energien entwickeln (A2, A3)

¹⁾ Kognitive Lernzielstufen nach Bloom:

- K1: Wissen (kurzfristig reproduzierbar)
- K2: Verstehen
- K3: Anwendung (auf neue Situationen)
- K4: Analyse (komplexer Verhältnisse)
- K5: Synthese (weiterdenken)
- K6: Bewertung (ein Urteil fällen)
(zitiert nach [arbowis]; verändert)

²⁾ Affektive Lernzielstufen nach Krathwohl:

- A1: Aufmerksam werden / Beachten
- A2: Reagieren
- A3: Werten
- A4: Organisation / Ordnen von Werten
- A5: Charakterisieren (von Werten)
(zitiert nach [arbowis];
Stufen in „A1“ bis „A5“ umbenannt)

Offene Fehlerkultur

Wo gehobelt wird, fallen Späne, und wo gearbeitet wird, passieren Fehler. Ich bitte deshalb die Leserinnen und Leser dieses Buches, mir Hinweise auf allfällige Irrtümer und Unstimmigkeiten per E-Mail zukommen zu lassen:

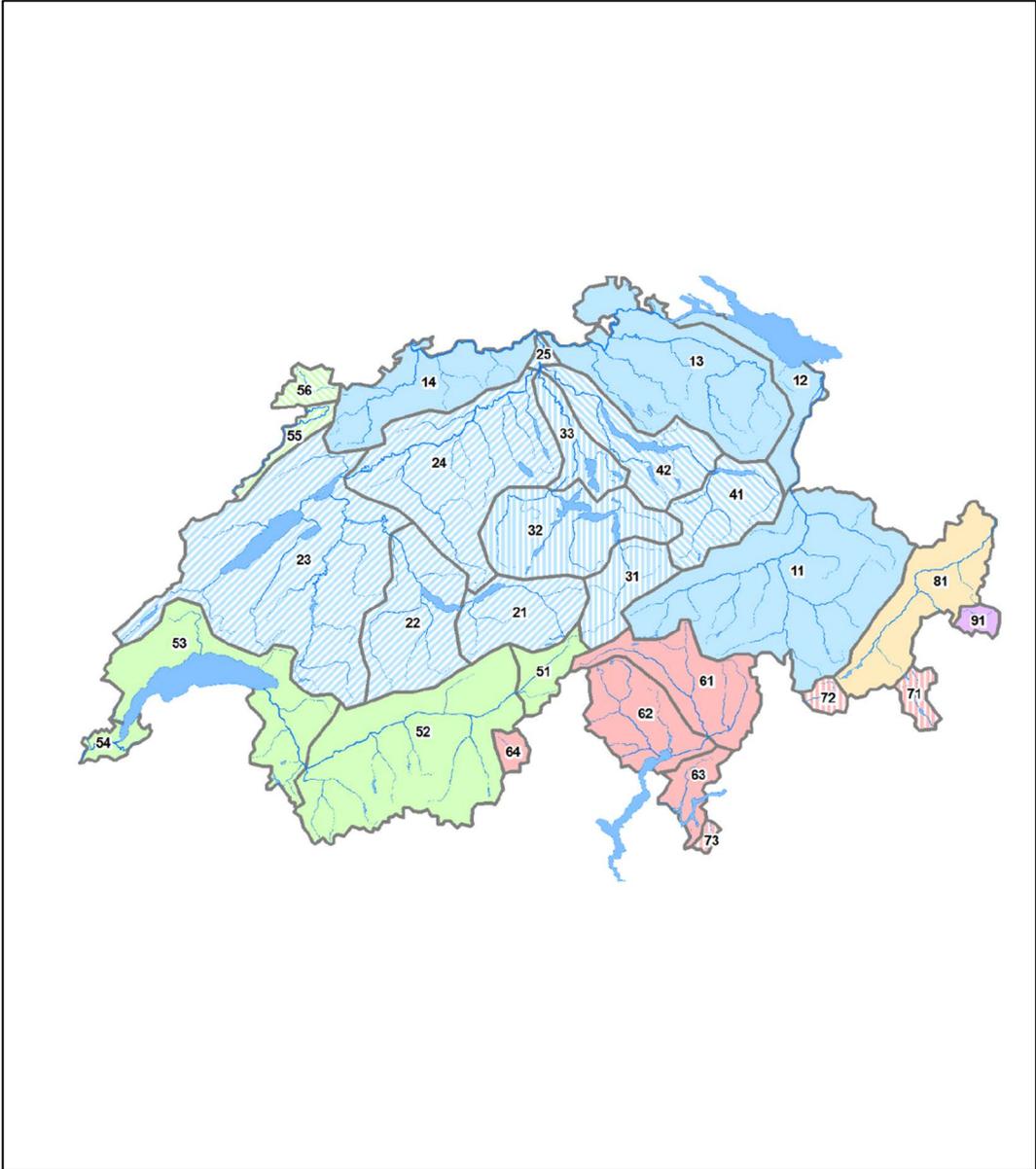
max.blatter@energie-atlas.ch oder
max@energie-blatter.ch

Bekannt gewordene Fehler werde ich in einem laufend aktualisierten PDF-Dokument korrigieren, das Sie auf meiner Website herunterladen können unter:

<http://www.energie-atlas.ch/permanent-urls/Korrigenda-Erneuerbar-CH.pdf>



1 Erneuerbare Primärenergieressourcen



1.1 *Allgemeines*

In diesem [Kapitel 1](#) wird gezeigt, wie das natürliche Energiepotenzial der in der Schweiz verfügbaren erneuerbaren Primärenergie-Ressourcen berechnet oder zumindest abgeschätzt werden kann. Als Ausgangspunkt geht man in der Regel von Größen aus, die aus den entsprechenden Wissenschafts-Disziplinen bekannt sind: etwa aus der Meteorologie oder Klimatologie, der Hydrologie, der Geophysik oder der Biologie.

Oft können die energietechnisch relevanten Größen erst in einem zweiten Schritt aus diesen Ausgangsgrößen abgeleitet werden. Gelegentlich ist es sogar erforderlich, einen iterativen Prozess der Zusammenarbeit zwischen Energiefachleuten einerseits und Vertreterinnen und Vertretern der oben genannten Ausgangsdisziplinen andererseits einzuleiten, durch den die benötigten Berechnungsgrundlagen erst entwickelt werden. Solche Entwicklungsarbeiten konnten im Rahmen dieses Buches natürlich nicht durchgeführt werden. Wo solche notwendig erscheinen, wird darauf hingewiesen; ansonsten hat sich der Autor in diesen Fällen bemüht, aus dem vorhandenen Datenmaterial und Wissensfundus die bestmöglichen Schätzungen des jeweiligen Energiepotenzials abzuleiten.

In einem dritten Schritt geht es darum abzuschätzen, welcher Anteil des natürlichen Energiepotenzials nachhaltig, also insbesondere auch ökologisch und gesellschaftlich verträglich, nutzbar ist. Dazu muss man sich zunächst für jede Energieressource im Klaren sein, welche Aspekte dabei Rolle spielen; diese müssen dann gegeneinander abgewogen werden. Dieser Prozess ist noch keineswegs abgeschlossen; wo bereits Resultate vorliegen, werden diese erwähnt; wo nicht, werden die zu erwartenden Größenordnungen ganz grob abgeschätzt.

Die nachfolgende [Tab. 1-1](#) gibt für die im Buch detailliert behandelten Energieressourcen einen ersten Überblick.

	<i>Ausgangsgrößen</i>	<i>Energierrelevante Größe</i>	<i>Limitierende Faktoren für die nachhaltige Nutzung</i>
Solarstrahlung	Globalstrahlung	Globalstrahlung	Für die Installation von Solaranlagen verfügbare Fläche
Windenergie	Windgeschwindigkeit	kinetische Wind-Energieflussdichte	Akzeptanz und ökologische Verträglichkeit hinsichtlich Landschaftsschutz, Geräuschimmissionen, Schutz der Fauna (Brutgebiete, Vogelzug, Kollision mit den Rotorblättern, ...)
Wasserkraft	Niederschlag, Abflussmenge, Höhe über Meer	Umsatz potenzieller Energie	Flora und Fauna der Gewässer (Restwassermengen), Ablagerung von Geschiebe, Behinderung der Fischwanderung, Beeinträchtigung uferbewohnender Tierarten, ...
Geothermie	geothermische Wärmeflussdichte, Temperaturgradient	geothermische Wärmeflussdichte, verfügbare Temperatur	Regenerationsphasen bei kontrollierter Übernutzung, Grundwasserschutz, seismische Probleme
Umgebungswärme	Wärmefluss, Temperatur	Wärmefluss, Temperatur	Unerwünschte Abkühlung der Umgebung
Biomasse	Primärproduktion	Heiz- oder Brennwert	Erhalt der Bodenfruchtbarkeit, Konkurrenz „Teller, Trog, Tischlerei, Tank“

Tab. 1-1 Überblick über die erneuerbaren Primärenergieressourcen, die zur Abschätzung ihres Energiepotenzials verwendeten Größen sowie die Faktoren, die das Ausmaß ihrer Nutzung limitieren

Als weiterer Aspekt wird in den nachfolgenden Abschnitten jeweils die sogenannte *Volatilität* betrachtet. Dieser Begriff bezeichnet allgemein die zeitliche Schwankung einer Größe; in der Energietechnik ist damit insbesondere die Witterungsabhängigkeit einer Energieressource gemeint: Je weniger volatil eine Ressource ist, desto höher ist ihr energiewirtschaftlicher Wert. Besonders wertvoll sind in dieser Hinsicht Ressourcen, die in konstanter Größe zur Verfügung stehen (geeignet als *Bandenergie*), nur noch getoppt von lagerfähigen Ressourcen (die sich als *Spitzenenergie* eignen).

1.2 *Direkt nutzbare Solarstrahlung*

Die immense Strahlung der Sonne kommt mit einer *Strahlungsflussdichte* zwischen 1320 W/m^2 und 1420 W/m^2 bei der Erde an (außerhalb der Erdatmosphäre gemessen), wobei der tiefere Wert am sonnenfernsten Punkt der Erdumlaufbahn gilt (am *Aphel*, das von der Erde Anfang Juli durchlaufen wird), der höhere am sonnen nächsten Punkt (*Perihel*, durchlaufen Anfang Januar). Im Jahresmittel beträgt der Wert rund 1370 W/m^2 (*Solarkonstante*). – Auf die Erdoberfläche bezogen (aber immer noch außerhalb der Erdatmosphäre) ergibt sich daraus im weltweiten Jahresmittel eine *Bestrahlungsstärke* von rund 340 W/m^2 .

1.2.1 *Meteorologische Daten: Globalstrahlung*

Infolge der Abschwächung in der Atmosphäre und durch die Bewölkung kommen im weltweiten Mittel nur etwa 50% der Strahlungsleistung am Erdboden an. Als Maß für die lokal verfügbare Bestrahlungsstärke wird an vielen meteorologischen Messstationen die sogenannte *Globalstrahlung* gemessen.

Die Globalstrahlung G ist die auf eine horizontale Bodenfläche aus allen Richtungen (= global) auftreffende Strahlungsleistung, dividiert durch eben diese Fläche. Sie hat somit die Einheit W/m^2 .

MeteoSchweiz [MeteoSchweiz Solar] misst derzeit die Globalstrahlung an über 130 Messstationen. Dies mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten, wobei auch Stunden-, Tages-, Monats- oder Jahresmittelwerte lieferbar sind. Für 59 dieser Stationen (Stand 2017) sind zudem die über die Jahre 1981-2000 gemittelten Monats- und Jahreswerte verfügbar (*Klimanormwerte*, siehe [Fig. 1-1](#) und [Tab. 1-2](#)).

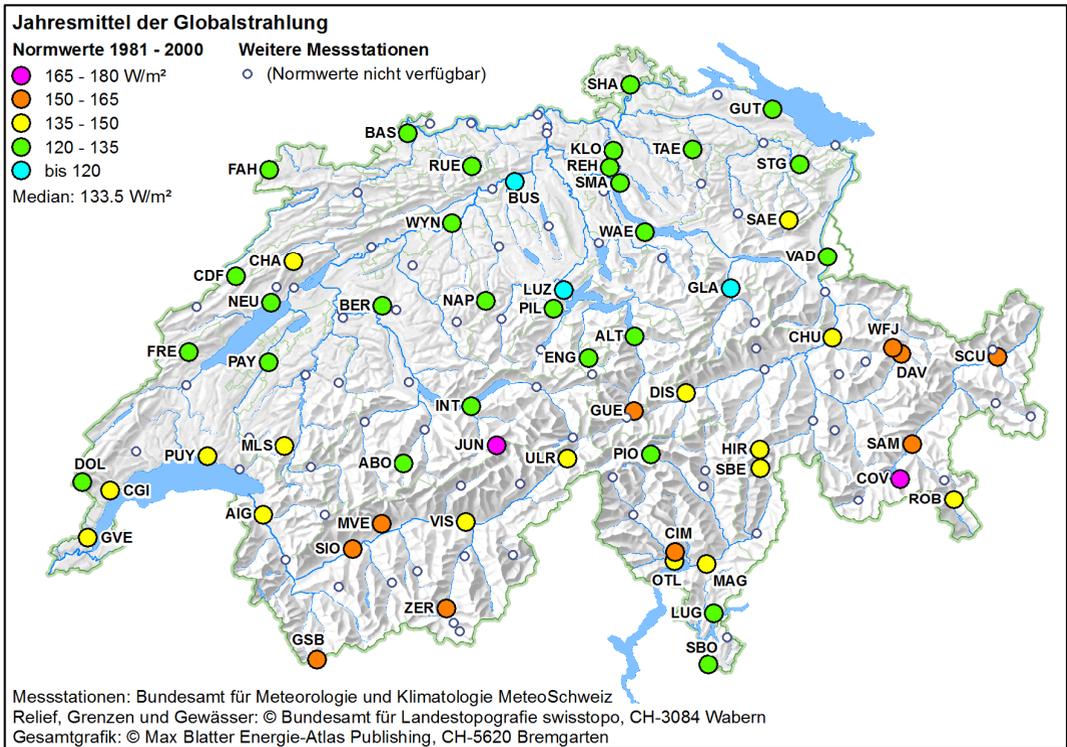


Fig. 1-1 Messstationen für die solare Globalstrahlung

*Median bedeutet: Gleich viele Messstationen liegen unter diesem Wert wie darüber.
 Datenbasis: [MeteoSchweiz Solar]*

<i>Abk</i>	<i>Name</i>	<i>Globalstrahlung in W/m²</i>
ABO	Adelboden	132
AIG	Aigle	139
ALT	Altdorf	124
BAS	Basel / Binningen	126
BER	Bern / Zollikofen	131
BUS	Buchs / Aarau	118
CDF	La Chaux-de-Fonds	131
CGI	Nyon / Changins	138

CHA	Chasseral	143
CHU	Chur	136
CIM	Cimetta	154
COV	Piz Corvatsch	177
DAV	Davos	152
DIS	Disentis / Sedrun	143
DOL	La Dôle	134
ENG	Engelberg	124
FAH	Fahy	124
FRE	Bullet / La Frétaz	130
GLA	Glarus	120
GSB	Col du Grand St-Bernard	155
GUE	Gütsch ob Andermatt	161
GUT	Güttingen	125
GVE	Genève-Cointrin	140
HIR	Hinterrhein	143
INT	Interlaken	128
JUN	Jungfraujoch	166
KLO	Zürich / Kloten	126
LUG	Lugano	134
LUZ	Luzern	118
MAG	Magadino / Cadenazzo	136
MLS	Le Moléson	141
MVE	Montana	158
NAP	Napf	121
NEU	Neuchâtel	126
OTL	Locarno / Monti	141
PAY	Payerne	133
PIL	Pilatus	133
PIO	Piotta	126
PUY	Pully	140
REH	Zürich / Affoltern	126
ROB	Poschiavo / Robbia	137
RUE	Rünenberg	126
SAE	Sântis	146
SAM	Samedan	158
SBE	S. Bernardino	138