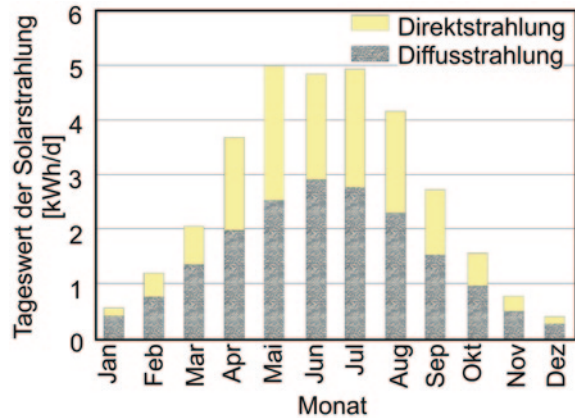


**Abb. 2.43** Jahresgang der Globalstrahlung als Summe von Diffusstrahlungsanteil und Direktstrahlungsanteil für einen typischen süd-deutschen Standort in der Bundesrepublik. Angegeben sind die über einen Monat gemittelten Tageswerte auf die Horizontale



zeigt. Die direkte Strahlungsintensität  $i_{dir}$  hingegen ist sowohl im sichtbaren wie im nahen infraroten Wellenlängenbereich vertreten.

Die Summe beider Komponenten Diffusstrahlung ( $i_{diff}$ ) und Direktstrahlung ( $i_{dir}$ ) wird als Globalstrahlung ( $i_{glob}$ ) bezeichnet. Da die Verteilung zwischen diffuser und direkter Strahlungsintensität vom Höhenstand abhängt, ist sie auch vom Jahresgang abhängig. Die Abb. 2.43 gibt den typischen Jahresgang der Globalstrahlung in Form der mittleren Tageswerte für einen Standort in der Bundesrepublik wieder. In Mitteleuropa überwiegt der diffuse Anteil. Im Jahresmittel liegt das Verhältnis von diffuser zu direkter Strahlung bei etwa 60:40. Lediglich in den Sommermonaten halten sich beide Komponenten größenordnungsmäßig in etwa die Waage. Auf die Nutzungsmöglichkeiten beider Komponenten wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Für die meisten Berechnungsfälle genügt es, die Strahlungsdichte der diffusen Strahlung eine über alle Richtungen isotrope Verteilung anzunehmen. Der Teil der diffusen Strahlung, der eine um den Winkel  $\beta$  zur Horizontalen geneigten Fläche erreicht, beträgt:

$$i_{diff,g} = i_{diff,h} \frac{1 + \cos \beta}{2} = i_{diff,h} \cdot \cos^2 \frac{\beta}{2}, \quad (2.71)$$

wobei der Index  $h$  die horizontale Richtung angibt und  $g$  für geneigt steht.

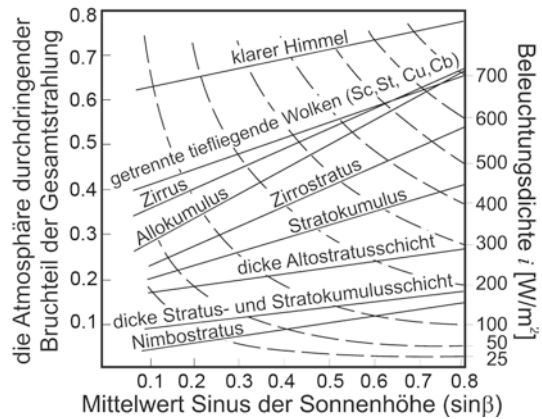
### 2.3.10.5 Einfluss von Wetter und Umgebung auf die Strahlungsintensität

Die Abb. 2.44 zeigt den Einfluss verschiedener Wolkentypen auf die Streuung in der Atmosphäre. Naturgemäß führen Kumuluswolken mit ihrem hohen Feuchteanteil zu einer hohen Streuung und reduzieren den Anteil der Strahlung, die den Kollektor erreicht.

Auch hier kommt es mit abnehmenden Sonnenhöhenwinkeln zu einer erhöhten Streuung und in der Folge verringert sich die am Boden ankommende Strahlungsintensität deutlich.

Kollektoren verfügen im Regelfall auf der Rückseite eine nicht transparente thermische Isolierung. Ein geneigter Kollektor kann daher die diffuse Strahlung auch nur teilweise empfangen. Dafür kann er einen Teil der vom Boden reflektierten Globalstrahlung  $i_{refl,g}$

**Abb. 2.44** Einfluss verschiedener Wolkentypen. Die Geraden repräsentieren empirische Relationen zwischen solarer Strahlung und Sonnenhöhe für verschiedene Wolkentypen nach Messungen in Nordatlantik (52 °N, 20 °W). Die Kurven stellen Isoplethen der Beleuchtungsichten (nach Lumb) dar. *Sc* Stratokumulus, *St* Stratus, *Cu* Cumulus, *Cb* Kumulonimbus



nutzen. Der Boden reflektiert entsprechend dem Reflexionskoeffizienten  $\rho_{\text{Boden}}$ . Der Anteil, der den Kollektor erreicht, ergibt sich aus der Globalstrahlungsintensität  $i_{\text{glob}}$ , dem Reflexionskoeffizienten des Bodens  $\rho_{\text{Boden}}$  und der Neigung des Kollektors gegenüber der Horizontalen  $\beta$ . Es ist:

$$i_{\text{refl,g}} = i_{\text{glob}} \rho_{\text{Boden}} \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right). \quad (2.72)$$

Weiterhin wird am Boden die Globalstrahlung diffus mit  $\rho_{\text{Boden}}$  reflektiert. Die reflektierte Strahlung kann nur auf der transparenten Frontseite genutzt werden. Entsprechend dem Neigungswinkel des Kollektors trifft auf diese der Anteil  $(1 - \cos \beta)/2$  (s. Gl. (2.64)). Die Globalstrahlung  $i_{\text{glob}}$  auf eine Kollektorfläche folgt dann als Summe unter Verwendung der Gl. (2.52), (2.62) und (2.64):

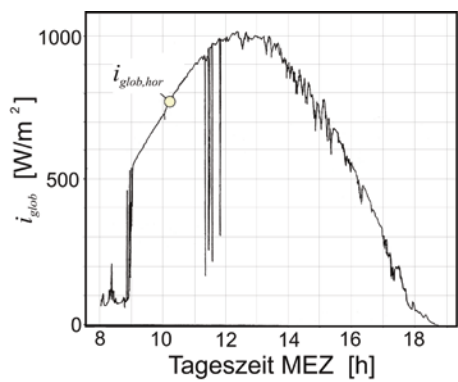
$$i_{\text{glob}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} i_{\text{dir,h}} + \frac{1 + \cos \beta}{2} i_{\text{diff,h}} + \rho_B \frac{1 - \cos \beta}{2} i_{\text{glob,h}}. \quad (2.73)$$

Die diffuse Strahlung wird hierbei als isotrop im oberen Halbraum angesehen. Die Winkelabhängigkeit, wie sie in Abb. 2.32 angesprochen wurde, wird hier vernachlässigt.

Das Reflexionsvermögen verschiedener Bodenoberflächen ist der Tab. 2.8 angegeben. Diese Reflexionsvermögen wird oft auch als Albedo (lateinisch *albus* = „weiß“) bezeichnet und ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden (nicht selbst leuchtenden Oberflächen). Das Albedo ist der Quotient aus reflektierter zu einfallender Lichtmenge und daher liegt sein Wert zwischen 0 und 1. Es ist vor allem in der Meteorologie bedeutsam, da es Aussagen darüber ermöglicht, wie stark sich Luft über verschiedenen Oberflächen erwärmt. Die Eis-Albedo-Rückkopplung beeinflusst den Strahlungsantrieb und damit die Strahlungsbilanz der Erde. Selbst unterschiedliche Schneesorten weisen einen zum Teil erheblich unterschiedlichen aber hohen Reflexionsgrad auf, während der des Wassers nahezu vernachlässigbar ist.

**Tab. 2.8** Reflexionsgrade  
 $\rho_{\text{Boden}}$  für Solarstrahlung

Bodenart	$\rho_{\text{Boden}}$ [/]
Neuschnee	0.75–0.95
Altschnee	0.40–0.70
Sandboden	0.15–0.40
Asphalt	0.15
Wiesen und Felder	0.12–0.30
Straßen und Häuser	0.15–0.25
Wälder	0.05–0.20
dunkler Fußboden	0.07–0.10
Wasser (abhängig vom Einfallswinkel der Einstrahlung, Verschmutzung, Algegehalt, ...)	0.03–0.22



**Abb. 2.45** Globale Einstrahlung auf eine horizontale Fläche in Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe) am 30. 8. 1989; nach einigen Abschattungen durch benachbarte Bäume am Vormittag zeichnete sich ein Tag mit schönem Wetter ab; die linienartigen Absenkungen um ca. 11.30–12.00 Uhr wurden durch Abschattungen des Messgerätes bewirkt und demonstrierten mit dem unteren Wert den diffusen Anteil der Einstrahlung; eine der Linien hatte sich durch einen Kondensstreifen eines Flugzeuges ergeben

### 2.3.11 Typische Werte der Globalstrahlung

Streuung und Absorption reduzieren die Einstrahlung gegenüber der extraterrestrischen Leistungsdichte an einem Standort wie Karlsruhe mit  $49^\circ$  nördlicher Breite so, dass die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche selbst an einem klaren Tag zur Mittagszeit im Sommer selten den Wert von  $1000 \text{ W/m}^2$  übersteigt.

Der in Abb. 2.45 aufgezeichnete Tagesverlauf der globalen Strahlung auf eine horizontale Fläche zeigt mit einem kosinusähnlichen Verlauf die Auswirkung der Winkelbeziehungen (Gl. 2.44, 2.50 und 2.51). Am Nachmittag lassen sich trotz der nach wie vor hohen Einstrahlung häufig anzutreffende Feinstrukturen mit Schwankungen der Leistungsdichte um  $\pm 5 \%$  erkennen. Als Vorwegnahme zur Betrachtung über den Wirkungsgrad thermischer Solarkollektoren sei hier darauf hingewiesen, dass ein Kollektor mit einer Mindesteinstrahlung zunächst die Wärmeverluste an die Umgebung abdecken muss. Erst bei darü-

ber hinaus gehender Einstrahlung kann eine Nutzleistung abgeführt werden. Die genannte Feinstruktur des täglich verfügbaren Solarstrahlungsangebots bekommt dann einen viel größeren Anteil an der Nutzleistung.

Der Kollektor und alle nachgeschalteten Einrichtungen müssen mit solchen Schwankungen fertig werden oder es müssen Speicher in das Gesamtsystem eingebunden sein.

Photovoltaische Zellen haben dagegen einen Wirkungsgrad annähernd proportional zur Einstrahlung. Sie können auch bei kleinen Einstrahlungen Leistung abgeben. Tage mit geringen Einstrahlungsleistungen sind aber solche mit starker Bewölkung, die wiederum starke Leistungsschwankungen aufweisen. Hohe und schnelle Leistungsschwankungen werden auch durch die zuvor erwähnten Reflexionen an Wolken bewirkt. Dementsprechend stellen sich Anforderungen an die nachgeschalteten elektrischen Systeme. Die Gesamtstrahlung an einem Standort wird also durch die jahreszeitlichen Schwankungen aber auch durch die Einflüsse auf Grund der Wetterlage bestimmt. Als langjähriger Jahresmittelwert der Einstrahlung auf eine horizontale Fläche gilt für Karlsruhe etwa 1100 kWh pro Quadratmeter und Jahr. Dies sind in etwa nur 45 % der extraterrestrisch auf eine horizontale Fläche treffenden Solarstrahlung.

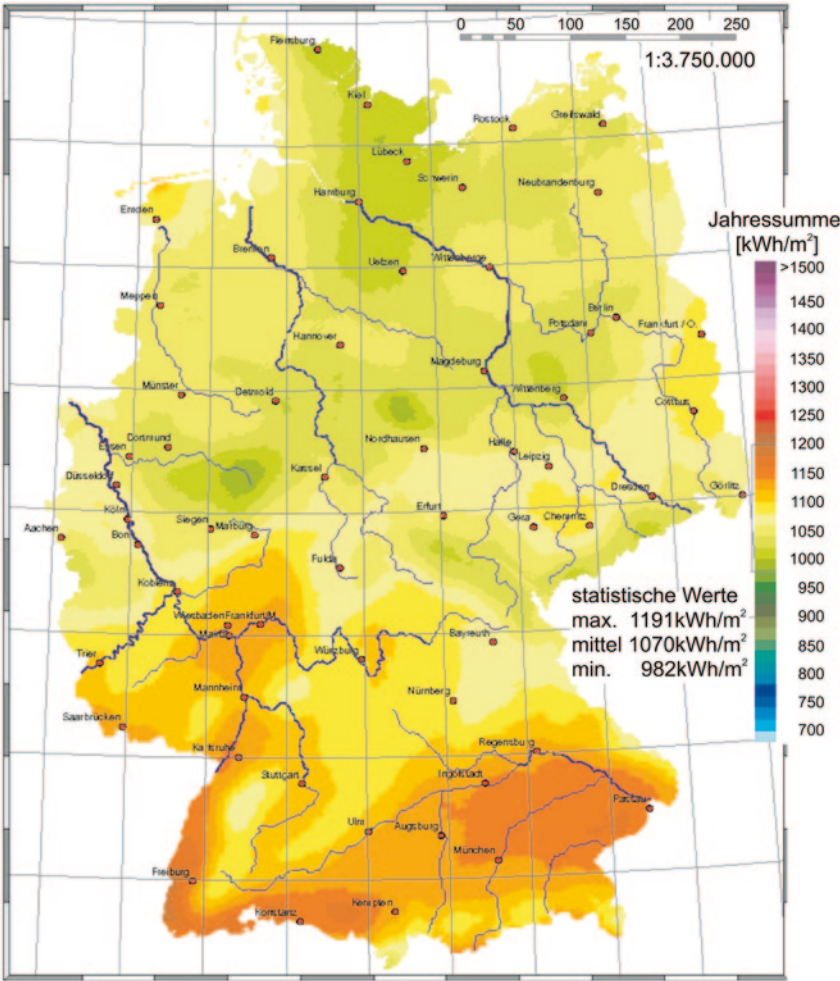
Einen Überblick über die Verteilung der jährlichen Globalstrahlung auf Deutschland, Europa und auf der Erde geben die Abb. 2.46, 2.47 und 2.48. Danach variiert die mittlere jährliche Einstrahlung um bis zu 25 % allein in Deutschland. Weltweit gibt es Gebiete, in denen etwa das Doppelte der maximal in Deutschland verfügbaren jährlichen Einstrahlung vorhanden ist. Von hoch gelegenen Standorten in Nordamerika liegen Messwerte bis 2800 kWh/m<sup>2</sup>a vor. Genauere Wetter- oder Einstrahlungsdaten, wie sie für die Vorausberechnung von Kollektorleistungen benötigt werden, können inzwischen weltweit von vielen Wetterämtern bezogen werden. In Deutschland ist dies beispielsweise der Deutsche Wetterdienst (Wetterdienst 2011). Zum Überblick sind hier nochmals einige typische Einstrahlungswerte zusammengestellt: Typische Maximalwerte der Globalstrahlung bei Sonnenhöchststand am Standort Karlsruhe sind etwa  $i_{\text{global}} = 800$  bis 1000 W/m<sup>2</sup> (höhere Werte treten nur auf, wenn Wolken zusätzlich Einstrahlung an den Standort reflektieren) während an einem wolkenverhangenen Wintertag auch zur Mittagszeit nur  $i_{\text{global}} = 100$  W/m<sup>2</sup> gemessen werden können.

Über ein Jahr aufsummiert erreicht die Einstrahlung in:

	kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
Karlsruhe	1100
Freiburg	1200
Sahara	2200
Kalifornien	2800

### 2.3.12 Einstrahlung bei Bewölkung – Statistische Verfahren

Während die Intensität bzw. Tagessummen der extraterrestrischen Strahlung mittels der zuvor angegebenen Winkelbeziehungen berechnet werden können, müssen witterungsbe-



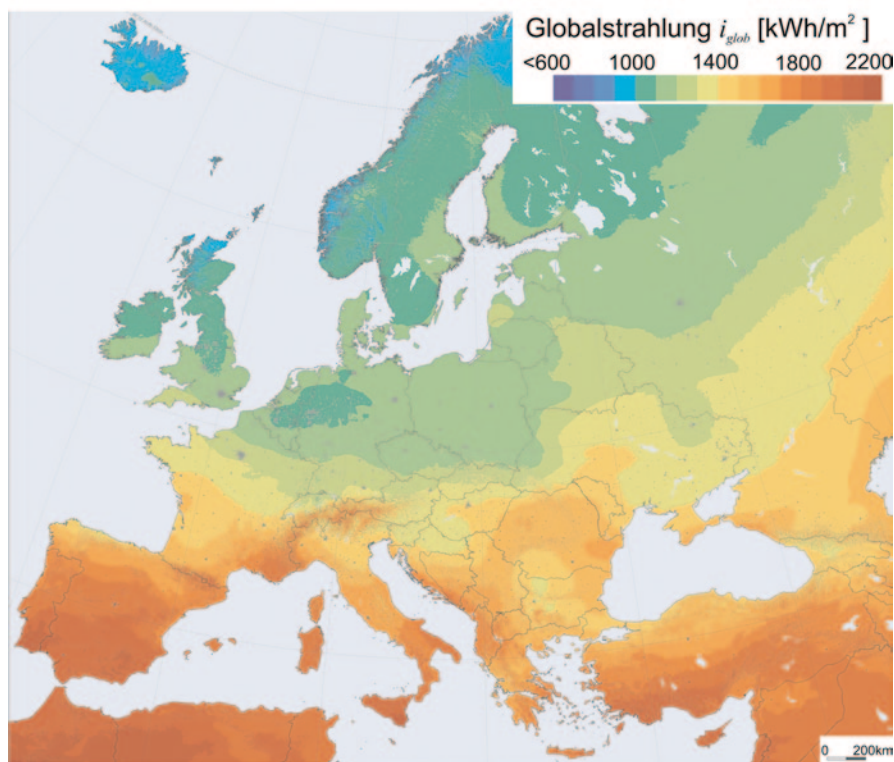
**Abb. 2.46** Jahressumme der regionalen jährlichen Einstrahlung in Deutschland auf eine horizontale Flächen kWh/m². Quelle Deutscher Wetterdienst. (Wetterdienst 2011)

haftete Werte der Globalstrahlung am terrestrischen Standort aus Messwerten von Wetterstationen als statistische Mittelwerte abgeleitet werden. Für Karlsruhe reichen die mittleren monatlichen Tagessummen der Globalstrahlung von 0.85 kWh/(m²d) im Winter bis zu 8.6 kWh/(m²d) im Sommer (s. Tab. 2.9).

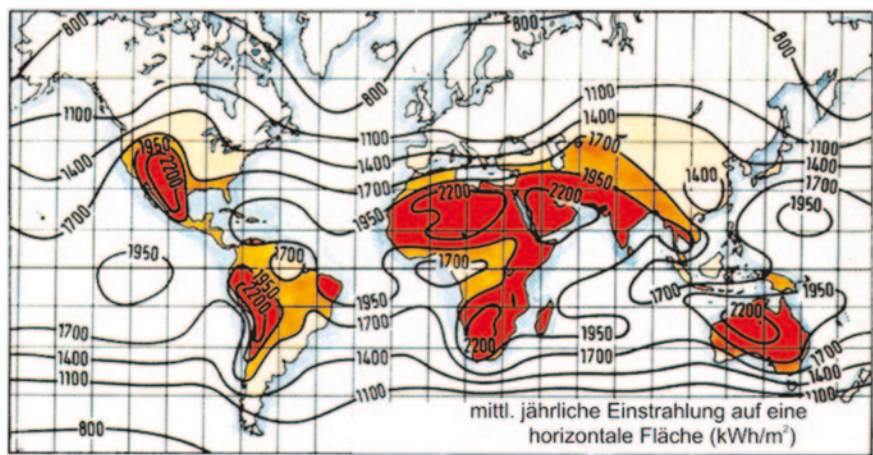
Neben diesen Tagessummen der Globalstrahlung ist in der Tab. 2.9 in der zweiten Zeile das Verhältnis  $\bar{K}_T$  zur mittleren monatlichen Tagessumme der extraterrestrischen Einstrahlung auf eine horizontale Fläche angegeben. Der  $K_T$  Wert beschreibt das Verhältnis der Globalstrahlung zur extraterrestrischen Einstrahlung.

$$K_T = \frac{i_{glob}}{i_{extra}} \quad \text{Atmosphäre} \cdot \text{Transparenz (clearness factor)}, \quad (2.74)$$





**Abb. 2.47** Verteilung der Jahressumme der Globalstrahlung auf eine horizontale optimal nach Süden ausgerichtete Fläche in Europa kWh/m<sup>2</sup>. (Europäische Kommission 2006)

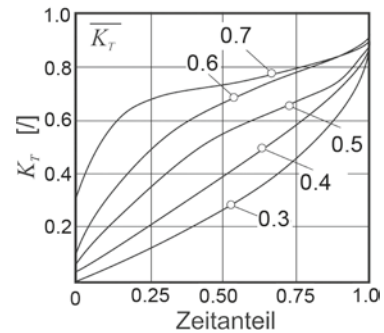


**Abb. 2.48** Mittlere Jahressumme der Globalstrahlung der Erde auf eine horizontale Fläche in kWh/m<sup>2</sup>. (Fasholz et al. 1987)

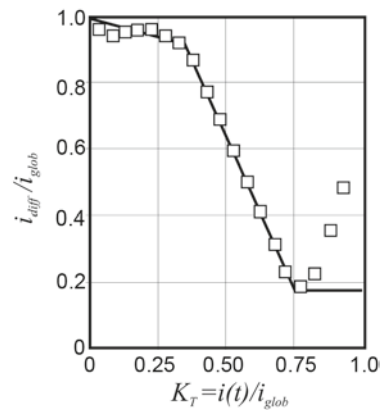
**Tab. 2.9** Monatliche Mittelwerte der Einstrahlung  $\bar{i}_{gl}$ , der  $\bar{K}_T$ -Werte, Temperatur  $\bar{T}_U$  und Gradtage für einige Städte in der Bundesrepublik Deutschland

	Jan.	Feb.	März.	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	Dez.
Bochum (51.17°)												
$\bar{i}_{gl}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	2.29	4.81	9.56	16.14	18.84	20.95	19.07	17.02	12.03	6.81	3.05	1.76
$\bar{K}_T$	0.274	0.356	0.441	0.524	0.497	0.510	0.484	0.510	0.498	0.428	0.321	0.255
$\bar{T}_U$ (°C)	1.7	2.5	4.9	8.3	13.1	15.7	17.2	16.5	13.9	9.6	5.1	2.7
GT (Kd)	536	462	437	321	60	0	0	0	14	291	417	505
Hamburg (53.63°)												
$\bar{i}_{gl}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	2.99	5.99	11.56	18.66	24.18	25.35	23.59	19.83	14.96	8.04	3.23	1.94
$\bar{K}_T$	0.432	0.497	0.569	0.625	0.645	0.619	0.602	0.607	0.636	0.556	0.402	0.351
$\bar{T}_U$ (°C)	0.3	1.0	3.5	7.5	13.3	15.4	17.1	16.2	13.6	8.8	4.2	1.6
GT (Kd)	580	504	481	345	56	0	0	0	35	316	444	539
Hannover (52.47°)												
$\bar{i}_{gl}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	2.64	6.45	11.27	18.89	22.59	23.30	21.83	19.78	13.91	10.15	3.76	2.29
$\bar{K}_T$	0.348	0.506	0.538	0.624	0.600	0.568	0.556	0.599	0.577	0.670	0.431	0.372
$\bar{T}_U$ (°C)	0.7	1.3	4.0	7.8	12.8	15.7	17.2	16.4	13.5	8.9	4.5	1.9
GT (Kd)	567	496	465	336	77	0	0	0	42	313	435	530
Karlsruhe (49.02°)												
$\bar{i}_{gl}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	1.11	2.41	3.91	5.58	8.18	8.40	8.56	6.03	4.92	3.29	1.13	0.85
$\bar{K}_T$	0.414	0.586	0.618	0.636	0.771	0.738	0.777	0.639	0.670	0.691	0.376	0.374
$\bar{T}_U$ (°C)	1.0	2.4	5.6	9.6	14.3	17.4	19.1	18.1	14.5	9.6	5.0	2.2
GT (Kd)	558	465	415	282	7	0	0	0	0	291	420	521

**Abb. 2.49** Tagesmittelwerte  $K_T = i_{glob}/i_{extra}$  über den monatlichen Zeitanteil als Funktion der monatlichen, mittleren, gemessenen Tagessummen  $\bar{I}$  bezogen auf die monatliche, mittlere, extraterrestrische Tagessumme  $I_0$  auf eine horizontale Fläche  $\bar{K}_T = \bar{I}/I_0$  (auch auf stündliche Mittelwerte anwendbar). (Duffie und Beckman 1991)



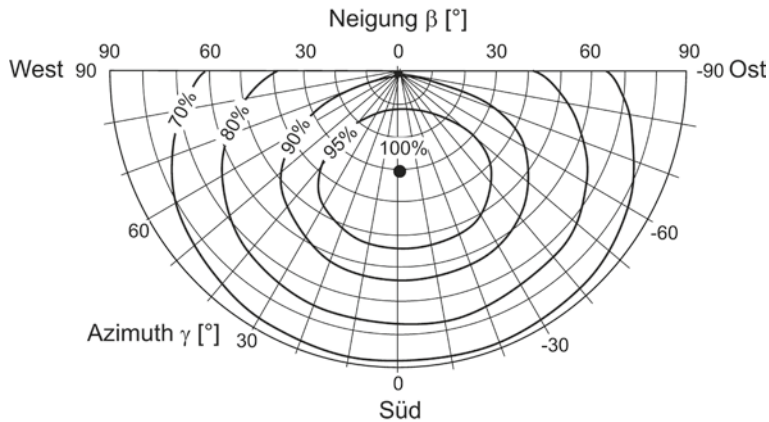
**Abb. 2.50** Diffuser Strahlungsanteil  $i_{diff}$  als Funktion der Globalstrahlung bezogen auf die extraterrestrische Strahlung auf eine horizontale Fläche jeweils als stündlicher Mittelwert. (Duffie und Beckman 1991)



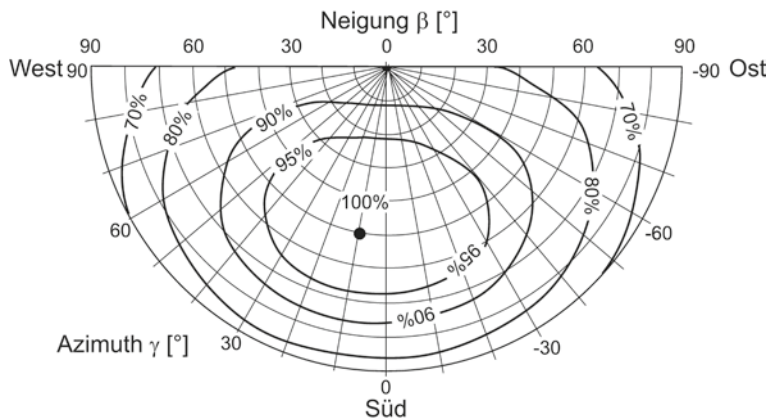
Damit entspricht er der atmosphärischen Transparenz oder dem „clearness factor“.  $K_T$ -Werte können aus Momentanwerten, mittleren Stundenwerten oder mittleren Tagessummen gebildet werden. Mittels Auswertung von Aufzeichnungen zahlreicher Messstationen in USA wurde eine Kurvenschar ermittelt, mit der aus den Monatsmittelwerten  $\bar{K}_T$  eine statistische Verteilung von  $\bar{K}_T$ -Werten für Einzeltage oder Untermengen eines Monats angegeben werden können (z. B. für  $\bar{K}_T = 0.7$  haben 7 Tage (25 %) einen Tageswert mit  $\bar{K}_T \approx 0.55$ ; 2 · 7 Tage (2 · 25 %) kommen auf ein Verhältnis  $\bar{K}_T \approx 0.7$  und die restlichen 25 % erreichen  $\bar{K}_T \approx 0.85$ .) Die Abb. 2.49 zeigt die  $K_T$ -Werte als Funktion des Zeitanteils. Es hat sich gezeigt, dass die gleiche Kurvenschar auch verwendet werden kann, um aus Tageswerten  $\bar{K}_T$  Stundenwerte von  $K_T$  abzuleiten.

Das Verfahren wurde mit Daten von Standorten außerhalb der USA verglichen und eine weitgehende Übereinstimmung gefunden. Starke Abweichungen wurden nur für Orte in großen Höhenlagen festgestellt. Gleichfalls aus statistischen Untersuchungen wurde ein Zusammenhang zwischen dem diffusen Anteil an der Globalstrahlung in Abhängigkeit vom  $K_T$ -Wert erstellt, der in der Abb. 2.50 dargestellt ist. Die Kurven in Abb. 2.49 und Abb. 2.50 können auch als mathematische Beziehungen angegeben werden.



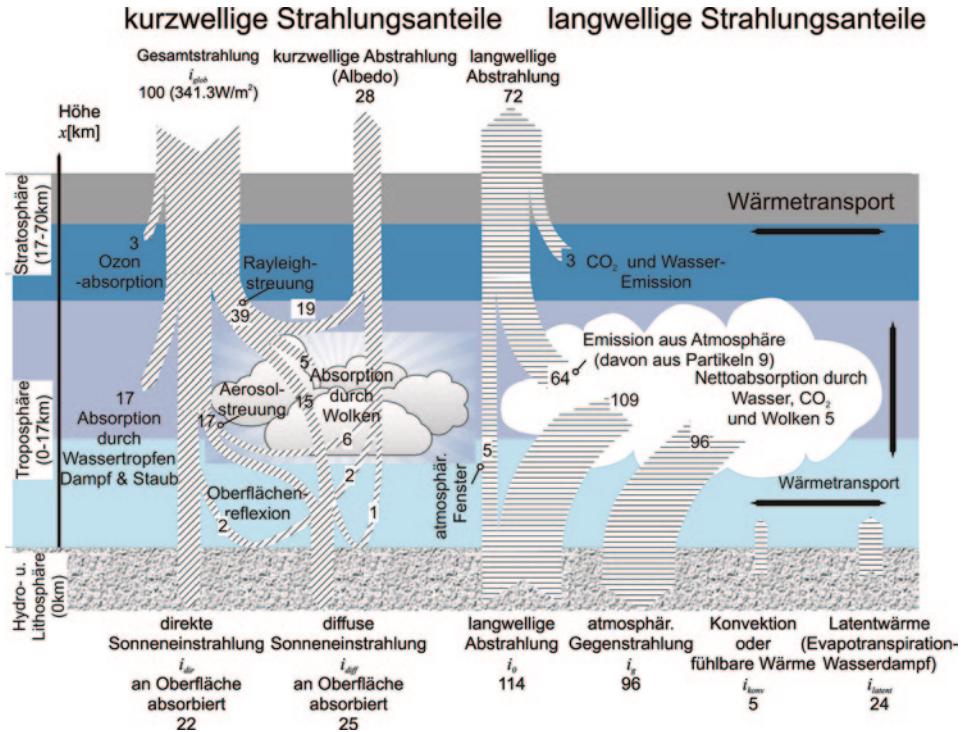


**Abb. 2.51** Relative Einstrahlungen auf geneigte Flächen in Trier Einstrahlung auf geneigte Flächen (Trier, Perez-Modell, Bodenreflektivität  $\rho_{\text{Boden}} = 0.2$ ). 100 % = 1143 kWh/(m<sup>2</sup>·Jahr). (Nast 1994)



**Abb. 2.52** Relative Systemausbeuten einer typischen solaren Warmwasseranlage in Trier. (Trier Perez-Modell, Bodenreflektivität  $\rho_{\text{Boden}} = 0.2$ , Warmwasserbedarf 200 Liter/Tag). 100 % = 272 kWh/(m<sup>2</sup>·Jahr). (Nast 1994)

Die Einstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche kann nach diesem Verfahren dann als Summe von Stundenwerten für die direkte und diffuse Strahlung getrennt über einen größeren Zeitraum, beispielsweise als Jahressumme berechnet werden. Die Stundenwerte mit dem Wirkungsgrad eines Solarsystems, der dann auch abhängig von der Einstrahlungsleistung (s. nächster Abschnitt) sein kann, können dann als Jahresenergieertrag eines Kollektorsystems numerisch ermittelt werden. Dies ist für den Standort Trier in den Abb. 2.51 und 2.52 für ein Kollektorsystem zur Brauchwassererwärmung graphisch dargestellt. Die Graphen zeigen dabei den Einfluss des Neigungswinkels und der Orientierung der Kollektoraufstellung. Wenn man nur auf wenige Prozent der Jahresleistung verzichtet



**Abb. 2.53** Schema der Strahlungsbilanz für das System Erde plus Atmosphäre. Die Zahlen geben den prozentualen Anteil der einfallenden Gesamtstrahlung mit  $341.3 \text{ W/m}^2$ -Jahren. (Kleemann und Meli $\ddot{\text{u}}$  1988)

zeigen die Graphen, dass es einen großen Spielraum bezüglich der Kollektororientierung gibt.

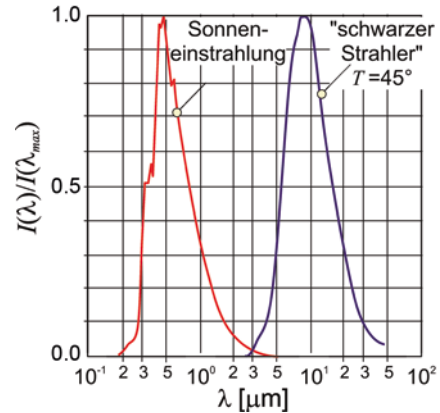
## 2.4 Terrestrisch nutzbare Solarstrahlung, Strahlungsbilanz der Erde

Die extraterrestrische Strahlung wird vor allem durch folgende Einflüsse in der Intensität und im Spektralverlauf beeinträchtigt, bevor sie auf die Erdoberfläche trifft.

- Reflexion an der Atmosphäre und der Erdoberfläche (sog. Albedo, ca. 30 %).
- Streuung an Bestandteilen der Atmosphäre.
- Absorption durch die Atmosphäre.

Die Abb. 2.53 zeigt schematisch die Strahlungsbilanz für das System Erde plus Atmosphäre. Aus der Grafik geht deutlich hervor, dass in der Stratosphäre (17–70 km Höhe) lediglich die Absorption durch Ozon die einfallende Gesamtstrahlung  $i_{glob}$  schwächt. Ein Albedo

**Abb. 2.54** Extraterrestrisches Solarspektrum der Gesamtleistung  $I = 1.35 \text{ W/m}^2$  bezogen auf den Maximalwert von  $I_{\max} = 2074 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ; *rechte Kurve*: Spektrum eines schwarzen Strahlers der Temperatur von  $45^\circ\text{C}$  und eine Gesamtstrahlungsleistung von  $600 \text{ W/m}^2$  bezogen auf den Maximalwert des Spektrums mit  $I_{\max} = 43 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$



(Rückstrahlung) tritt praktisch nicht auf. In der Troposphäre zwischen 0 und 17 km Höhe hingegen kommt es durch Absorption zu vielfältigen Absorptions- und Streuprozessen, deren prozentualer Anteil im kurzwelligen Bereich zum Teil erheblich ist. Diese deutliche Unterscheidung zwischen der kurzwelligen solaren Einstrahlung und langwelligen thermischen Abstrahlung erleichtert die Bilanzierung erheblich.

Um die Begriffe kurz- und langwellig, solare Strahlung und Wärmestrahlung zu verdeutlichen, sind die Spektren der Sonne und eines schwarzen Strahlers bei  $45^\circ\text{C}$  schematisch in Abb. 2.54 dargestellt. Sie verdeutlicht die vernachlässigbare Überschneidung beider Spektren zwischen einer Wellenlänge von  $3\text{--}5 \mu\text{m}$ . Die letztendlich auf die Erdoberfläche auftretende kurzwellige Strahlung kann in zwei Komponenten aufgeteilt werden:

- Direkte Strahlung  $i_{\text{dir}}$ ;
- diffuse Himmelsstrahlung  $i_{\text{diff}}$ .

Der Strahlungshaushalt der Erde ist der wichtigste Bestandteil des Energiehaushalts der Erde. Er bestimmt in welchem Maße sich das globale und lokale Klima verändert. Über den Teilbereich der Strahlungsbilanz werden dabei die verschiedenen Haushaltsgrößen in einer Gleichung rechnerisch bilanziert. Hierbei unterscheidet man zwischen dem kurzwelligen Bereich und dem langwelligen.

Im Strahlungshaushalt hingegen werden auch die Wechselbeziehungen zwischen beiden Bestandteilen dargestellt. Die einfallende Sonnenstrahlungsleistungsdichte ist vom Spektrum her kurzwellig, deshalb wird dieser Zusammenhang auch als kurzwellige Strahlungsbilanz ( $i_k$ ) bezeichnet. Es ergibt sich.

$$i_k = i_{\text{glob}} - r = i_{\text{dir}} + i_{\text{diff}} - r = (1 - \rho_{\text{boden}}) \cdot i_{\text{glob}}, \quad (2.75)$$

worin  $i_{\text{dir}}$  und  $i_{\text{diff}}$  die direkte und die diffuse Strahlungsintensität darstellen und  $r$  die Reflexionsintensität.  $\rho_{\text{Boden}}$  ist das Albedo oder der Reflexionskoeffizient und  $i_{\text{glob}}$  die Globalstrahlungsintensität. Aus Abb. 2.53 erkennt man, dass im globalen Mittel nur etwa 47 %

der Sonnenstrahlung als direkte oder diffuse Strahlung auf die Erdoberfläche gelangt. Dies entspricht im Mittel in etwa  $700 \text{ W/m}^2$ . Das globale Mittel zwischen direkter und diffuser Einstrahlung ist 25:22, also 53 % beträgt die Direktstrahlung während der diffuse Anteil 47 % ausmacht. Zum Vergleich im Mittel der Bundesrepublik beträgt das Verhältnis direkt zu diffus 60:40.

Die Erdoberfläche emittiert Wärmestrahlung (infrarot). Da diese Strahlung langwellig ist, wird diese Formel auch als langwellige Strahlungsbilanz ( $i_l$ ) bezeichnet:

$$i_l = i_e = i_0 - i_g. \quad (2.76)$$

Darin bezeichnet  $i_e$  die effektive Ausstrahlungsintensität,  $i_0$  die Intensität der Ausstrahlung der Erdoberfläche, der sogenannten terrestrischen Strahlung, und  $i_g$  die Gegenstrahlung der Atmosphäre, die durch den Einfluss von Atmosphärgasen, Aerosolen und Wolken bestimmt wird. Die langwellige Temperatúrausstrahlung der Erde und die atmosphärische Gegenstrahlung sind entsprechend der Abb. 2.53 von gleicher Größenordnung wie die solare Einstrahlung. Hierdurch wird die Bedeutung des Absorptions- bzw. Emissionsverhaltens der Atmosphäre auf den Energiehaushalt der Erde deutlich. Wegen des geringen Exergiegehalts dieser langwelligen Strahlungsarten können sie jedoch nicht (oder nur kaum) genutzt werden. Unser Wetter wird vor allem durch die langwelligen Strahlungsprozesse beeinflusst. Durch die langwellige Abstrahlung und die atmosphärische Gegenstrahlung werden große Energiemengen zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre ausgetauscht. Als Nettoeffekt bleibt eine Abstrahlung von der Erdoberfläche in der Größenordnung von ca. 18 % der Solarkonstanten. Die langwellige Abstrahlung von der Erdoberfläche entspricht physikalisch der Schwarzkörperstrahlung eines Körpers mit der Temperatur der Erdoberfläche. Auch die atmosphärische Gegenstrahlung ist auf dieses Phänomen zurückzuführen.

Aus den beiden Gl. (2.75) und (2.76) für die Strahlungsaufnahme (einfallende Strahlung) und die Strahlungsabgabe (Emission), also für Gewinn und Verlust, lässt sich nun ermitteln, wie viel insgesamt zur Verfügung steht. Diese Gesamtstrahlungsintensität  $i_{tot}$  ergibt sich zu:

$$i_{tot} = i_k + i_l = i_{glob} - r - i_e. \quad (2.77)$$

Wie die Abb. 2.53 zeigt, ergibt sich in jeder Höhe ein Gleichgewichtszustand, in dem der Nettostrahlungsfluss null ist. Im Gleichgewichtsfalle muss daher gelten:

$$\underbrace{i_{dir} + i_{diff}}_{\text{kurzwellig}} + \underbrace{i_g}_{\text{langwellig}} = \underbrace{i_0 + i_{konv} + i_{latent}}_{\text{langwellig}}, \quad (2.78)$$

in der  $i_{konv}$  der konvektive normal zur Erde gehende Wärmetransport ist und  $i_{latent}$  die Wärme durch in die Atmosphäre verdampfendes Wasser wiedergibt. Eine unausgeglichene Strahlungsbilanz würde zwangsläufig zu einer Aufheizung oder Auskühlung der Erde führen.

Die in der Abb. 2.53 aus Kleemann und Meliß (1988) dargestellte Strahlungsbilanz der Erde verdeutlicht die Gesamtstrahlungsbilanz. Dies bedeutet die gesamte Einstrahlung entspricht der kurzwelligen Abstrahlung (Albedo) plus der langwelligen Abstrahlung

(Gl. 2.78). Die Zahlenangaben in Abb. 2.53 geben auf die gesamte Erde bezogene Mittelwerte wieder und sind auf die Globalstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (Solarkonstante, 100 %) bezogen.

Die zur Erde kommende Sonnenenergie wird durch Wolken, Luft und Boden (hier besonders von Schnee) zu 30 % wieder in den Weltraum reflektiert (das heißt die Albedo der gesamten Erde beträgt im Mittel  $\rho_{\text{Boden}} \approx 0.30$ ). Die restlichen 70 % werden absorbiert; hierbei ca. 20 % von der Atmosphäre und ungefähr 50 % vom Erdboden (vergleiche Abb. 2.53). Letztere werden durch Wärmestrahlung und Konvektion wieder an die Luftpumpe abgegeben. Würde nur diese Energie wieder vollständig in den Weltraum abgestrahlt werden, so läge die mittlere Lufttemperatur bei  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , während sie tatsächlich um  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt. Die Differenz erklärt sich aus dem natürlichen Treibhauseffekt der Atmosphäre. Die sogenannten Treibhausgase in der erwärmten Atmosphäre (vor allem Wasserdampf und Kohlendioxid) emittieren Infrarotstrahlung – auch in Richtung Erde. Der Nachschub für die abgestrahlte Energie erfolgt durch Konvektion und Absorption (ein Teil der Abstrahlung von der Erdoberfläche im Infraroten wird absorbiert).

Die von der Atmosphäre emittierte Infrarotstrahlung führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche um durchschnittlich  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Diese Zahlen gelten nur für die Erde als Ganzes. Lokal und regional hängen die Verhältnisse von zahlreichen Faktoren ab:

- von der Albedo der Erdoberfläche, die vom 30 %-Mittel stark abweichen kann (beispielsweise Schnee 40–90 %, Wüste 20–45 %, Wald 5–20 %),
- vom oben erwähnten Einfallswinkel der Sonnenstrahlen und der Dauer ihrer Einwirkung,
- von Bewölkung und Luftfeuchtigkeit,
- vom Wärmetransport durch Wind, von Luftschichtungen usw.

Prinzipiell sind alle Faktoren weitgehend modellierbar. Doch Details wie beispielsweise Stauwirkungen an Gebirgen, unregelmäßige Bewegung von Tiefdruckgebieten sowie mikroskopische Turbulenz- und Austauschwirkungen, die sich zum Teil erheblich auf das globale Gesamtsystem auswirken sind nicht in allen Details bekannt. Für gute Vorhersagen benötigt die Meteorologie außer enormen Rechenkapazitäten auch ein weltweit dichtes Raster von Messdaten über alle Luftschichten, was in der Praxis an Grenzen stößt.

---

## Literatur

- Duffie JA, Beckman WA (1991) Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley-Interscience, New York
- Europäische Kommission (2006) Photovoltaic Solar electricity potential in european countries, Institute for Environment and Sustainability-IES, Abrufbar unter <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmapi/eur.htm>
- Fröhlich C, Foukal PV, Hickey JR, Hudson HS, Willson RC (1992) Solar Irradiance Variability from Modern Measurements. In Sun in Time. (3rd Ausg.). Univ. of Arizona Press, Tucson

- Fröhlich C (1993) Relationship between solar activity and luminosity. *Advances Space Res* 13(9):429–437
- Gerthsen C, Kneser HO, Vogel H (1995) Physik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen. 17. Aufl. (Ausg.), Springer-Verlag GmbH, Berlin
- Hippler R (2005). Atmosphärenphysik. Universität Greifswald (Institut für Physik): Greifswald
- Iqbal M (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press Inc, New York
- Kasten F, Young AT (1989) Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl Opt* 28(22):4735–4738
- Kleemann M, Meliß M (1988) Regenerative Energiequellen. Springer-Verlag, Berlin.
- McCracken G, Scott P (2005) Fusion-The Energy of the Universe. Elsevier Academic Press, Burlington MA
- Nast M (1994) Dachorientierung- Auswirkungen auf die Kollektorausbeute. *Sonnenergie*, Heft 5, Seite 18ff. Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.
- Pecker J-C (1994) The sun: A synoptic view. *Vistas Astron* 38:111–164
- Stöcker H (1994) Taschenbuch der Physik. Harry Deutsch, Frankfurt/M
- Wetterdienst Deutscher (2011) Klimadaten. Offenbach abrufbar unter [www.dwd.de](http://www.dwd.de)



Die solare Einstrahlung gleicht der eines schwarzen Strahlers mit 5576 K und besitzt eine hohe Exergie. Die Leistungsdichte dagegen entspricht einem Strahler mit 121 °C. Für viele Anwendungen ist dies zu wenig, um eine ausreichende Betriebstemperatur (oder Exergie) sowie eine wirtschaftliche Flächennutzung zu erreichen. Mittels konzentrierender Spiegel wird die Leistungsdichte am Empfänger erhöht. Das Konzentrationsverhältnis aus Spiegel- und Empfängerfläche ist jedoch begrenzt. Die theoretische Begrenzung wird im Folgenden mittels des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik abgeleitet. Wichtiger sind jedoch Einschränkungen durch die technischen oder physikalischen Eigenschaften der Spiegel oder Konzentratoren und den Empfänger oder Absorber. Den Zusammenhang von deren Qualität und Anwendungsfällen werden aufgezeigt.

## 3.1 Abgrenzung zwischen aktiver und passiver Solarthermie

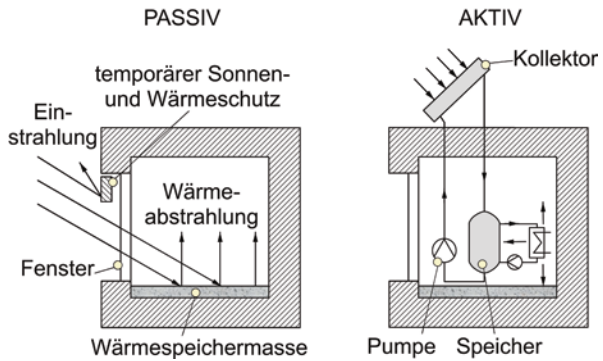
Die Wirkungsgrade oder auch Nutzleistungen der anschließend betrachteten technischen Lösungen zur Nutzung der Solarenergie ergeben sich aus der energetischen Bilanzierung von Einstrahlungs- und Verlustleistungen. Diese werden durch

- den baulichen Aufwand (Systemtechnik und Instrumentierung),
- ihr Komponentenverhalten sowie
- die Werkstoffeigenschaften bestimmt.

Dieser Gesamtkomplex bestimmt über die Effizienz im Wettbewerb mit anderen Systemen. Mit den Komponenten- oder Systempreisen sowie den Energieerträgen über beispielsweise ein Jahr lassen sich schließlich Energiegestehungskosten angeben.

Die thermische Nutzung von Solarenergie zielt auf die Bereitstellung von Prozesswärme für industrielle Aufgaben und auf Anwendungen im Gebäudebereich. Bei der Nutzung im Gebäudebereich unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Nutzungsweisen.

**Abb. 3.1** Schemaskizze zur Definition einer passiven respektive aktiven Nutzung der Sonnenenergie



Als aktive Systeme werden Gesamtkomplexe bezeichnet, die aus maschinentechnischen Komponenten aufgebaut sind. Sie beinhalten einen Wärmetransport mittels eines Wärmeträgers von der Stelle der Energieaufnahme, der als Kollektor bezeichnet wird, zur Energieabgabestelle, dem eigentlichen Exergienutzer. Um Schwankungen in der Bereitstellung der Exergie durch den Kollektor auszugleichen, werden oftmals Speicher zwischengeschaltet. Diese Verknüpfung von Maschinenelementen zwischen dem Kollektor und dem Exergienutzer (in Form von Wärme oder Kälte) bedingt Rohrleitungsnetze (Druckverluste, Wärmeverluste), Umwälzpumpen (Verbrauch elektrischer Exergie), Speicher (naturkonvektiver Wärmeaustausch und Mischungsverluste), Wärmetauscher (Übertragungsverluste bei unterschiedlichen Medien) sowie Regel- und/oder Steuereinrichtungen (Zeitverhalten und elektr. Exergieverbrauch). Sofern keine Naturkonvektion oder integrierten Kollektor-Speicher-Systeme eingesetzt werden (können), macht die Umwälzung des Wärmeträgers einen nicht zu vernachlässigenden Energie- und damit gleichbedeutend Exergieaufwand erforderlich. Hier ist eine detaillierte Systemberechnung aller Einzelkomponenten bis hin zum Exergienutzer erforderlich, damit ein effizientes System adaptiert an das Nutzungsverhalten ermittelt werden kann.

Die passive Nutzung von Sonnenenergie bezieht sich ausschließlich auf Gebäude, wobei lediglich bauliche Mittel zur Solarenergienutzung verwendet werden. Das Prinzip ist die

- Sammlung der Sonnenenergie durch entsprechend orientierte Fenster oder „transparente Wärmedämmungen“ (abgekürzt TWD), verbunden mit einem temporären Wärmeschutz, sowie
- Ausnutzung der Gebäudemassen als Wärmespeicher.

Sieht man von Abschattungseinrichtungen als Überhitzungsschutz im Sommer ab, ist Hilfsenergie zum Betrieb solcher Systeme meist nicht notwendig. In unserem Klima ist ein baulich exzellenter Wärmeschutz Voraussetzung für eine sinnvolle „passive“ wie auch „aktive“ Nutzung von Sonnenenergie (Fisch et al. 1984). Die Abb. 3.1 skizziert schematisch den Unterschied zwischen einer aktiven und einer passiven Nutzung der Sonnenenergie entsprechend der im vorangegangenen definierten Grundsätze.

Bei den aktiven Systemen unterscheidet man weiterhin in solche mit und ohne Konzentration. Die Konzentration erhöht durch Spiegel die Einstrahlungsleistung am Strahlungsempfänger, dem sogenannten Absorber. Es können so höhere flächenspezifische Wärmeverluste am Absorber abgedeckt werden. Mit anderen Worten der Absorber kann mit höheren Temperaturen betrieben werden.

In der Solartechnik ist ein Solarabsorber, kurz auch einfach Absorber, ein Bestandteil eines thermischen Sonnenkollektors. Er dient zur Aufnahme (Absorption) der Energie verschiedener Strahlungsanteile der Sonne. Die in Sonnenkollektoren enthaltenen Solarabsorber bestehen im Regelfall aus einem oder mehreren Absorberblechen aus Aluminium oder Kupfer. Unterstützt durch eine selektive Beschichtung erwärmt sich dieser Absorber im Sonnenlicht; diese Wärme wird durch eine den Absorber in Röhren durchströmende „Solarflüssigkeit“ aufgenommen und so zu einer Nutzereinrichtung bzw. einem Wärmespeicher transportiert. Der Rest des Solarkollektors dient zur Wärmeisolation des Absorbers (mittels Vakuum oder mittels geeigneter Isoliermaterialien), um Wärmeverluste zu vermeiden und eine höhere Arbeitstemperatur zu ermöglichen.

Anwendungen im Gebäudebereich verlangen in der Regel die Bereitstellung der Energie bei Temperaturen, die sich nur wenig von den Umgebungstemperaturen unterscheiden. Diese Systeme kommen daher zumeist ohne Konzentration aus.

Die Erzeugung von industrieller Prozesswärme mit höheren Prozesstemperaturen ist dagegen nur mit konzentrierenden Kollektorsystemen zu erreichen. Mit wachsender Temperaturanforderung steigt die Spiegelfläche im Verhältnis zum Absorber, das heißt, es wächst das Konzentrationsverhältnis.

Hochkonzentrierende Kollektoren werden häufig auch zur Stromerzeugung eingesetzt. Bezüglich der Kollektorkonstruktion kann dann nicht mehr zwischen thermischer und thermisch/mechanischer Solarenergienutzung unterschieden werden.

---

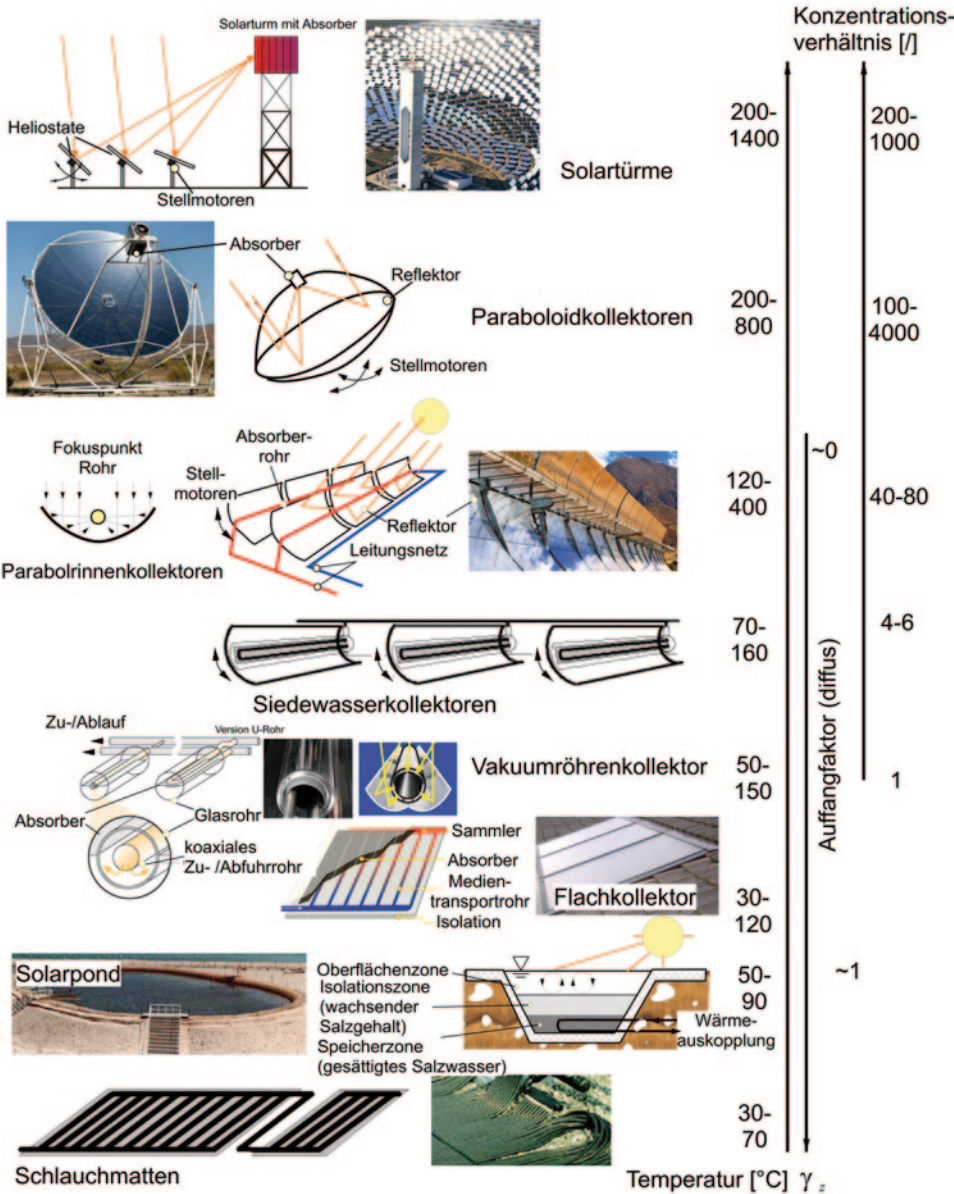
## 3.2 Kollektoren

### 3.2.1 Kollektorarten und typische Einsatztemperaturen

Den Zusammenhang zwischen Konzentrationsverhältnis und Temperatur verdeutlicht die in Abb. 3.2 skizzierte schematische Darstellung unterschiedlicher Kollektorsysteme, in der typische Einsatztemperaturen und Konzentrationsverhältnisse angegeben sind.

Mit steigender Leistungsdichte und Temperatur am Absorber wachsen die Ansprüche an die Kollektorkonstruktionen. Bei hohen Konzentrationsverhältnissen wird die zweiaxiale Nachführung sinnvoll. Sie erhöht nicht nur die Einstrahlung durch eine bessere Einstellung der Spiegel, sondern sorgt für ein gleichmäßiges Niveau der Leistungserzeugung über einen längeren Zeitraum.

Die einfachste Bauform ist der Schlauchmattenabsorber, in dem nahezu drucklos Wasser oder Luft umgewälzt wird. Bei dieser Bauform wird die einfallende Strahlung nicht



**Abb. 3.2** Schemaskizze zu den einzelnen Kollektortypen und dem entsprechenden Zusammenhang von Temperaturanforderungen und Konzentrationsverhältnis der Sonneneinstrahlung

konzentriert und durch die im Absorber über die Medienerwärmung – meist Wasser ohne Zusätze -entstehenden Dichteunterschiede erfolgt der Medientransport. Die Matten werden sinnvoll im Temperaturbereich von ca. 30 bis 70 °C betrieben. Bei großen Flächen oder ungeeigneten Höhenanordnungen werden auch Umwälzpumpen eingesetzt.

Ebenfalls ohne konzentrierende Systeme operiert das Solarpondkonzept. Durch Nutzung einer Salzlösung ergibt sich ein Konzentrationsgradient in Schwerfeldrichtung mit einer hohen Salzkonzentration am Boden (große Dichte) und einer geringen an der Oberfläche (geringe Dichte). Daher kann das Fluid, auch wenn sich die Bodenschicht aufheizt, nicht durch Naturkonvektion aufsteigen (und sich dort abkühlen), während das Sonnenlicht in die Bodenschicht vordringen kann und diese erwärmt. Die darüber liegenden Schichten isolieren und verhindern den Energieverlust. Am Boden des Solarponds kann die Energie in der untersten Schicht abgegriffen werden. Da dieses Prinzip im Wesentlichen stabil nur in aquatischen Systemen abläuft und der entgegen der Schwerkraft gerichtete Dichtegradient (durch Erwärmung) nur durch den Konzentrationsgradienten der Salzlösung kompensiert wird, ist der Einsatzbereich in der unteren Wärmeentnahmeschicht auf weniger als 100 °C beschränkt. In der darüber liegenden Isolationsschicht nimmt die Temperatur so weit ab, dass die Temperatur an der Oberseite der dritten, obersten Schicht ausreichend klein ist, um die Wärmeverluste durch Abstrahlung und Verdunstung zu begrenzen. Zur Reduktion der konvektiven Verluste durch Wind verhindern transparente Kunststoffbahnen die Wellenbildung.

In einem Flachkollektor wird der Absorber in einer Art Vitrine eingeschlossen. Im Flachkollektor wird der Absorber, durch den das Wasser zirkuliert, von einer Glasscheibe abgedeckt. Durch das Glas kann die Sonnenstrahlung den Absorber mit dem darin zirkulierenden Wasser ohne größere Verluste erreichen. Die Wärmeverluste durch Konvektion werden jedoch stark verringert, da die Luft den Absorber nicht mehr frei umströmen kann. Die Glasabdeckung reduziert auch die Wärmerückstrahlung des Absorbers, da diese langwelliger ist als die Einstrahlung und deshalb vom Glas in umgekehrter Richtung nur wenig durchgelassen wird. Der Flachkollektor wird auf der Rückseite durch eine gute Wärmedämmung gegen Abstrahl- und konvektive Verluste geschützt. Seine Wärmeverluste lassen sich weiter verringern, wenn man an der Frontseite eine zweite oder gar eine dritte Glasscheibe anbringt, aber damit verringern sich auch die Lichtdurchlässigkeit und der solare Strahlungsgewinn am Absorber. Eine doppelte Verglasung bewirkt also nicht notwendig eine Verbesserung des Wirkungsgrads. Vorteilhafter ist eine sogenannte transparente Wärmedämmung (TWD): Sie besteht aus wabenförmigen Kunststoffröhrchen, die das Sonnenlicht durch Mehrfachreflexionen auf den Absorber lenken. Zugleich schützt dieses transparente Material den Kollektor vor Wärmeverlusten. Allerdings kann es bei sehr hohen Temperaturen schmelzen, weshalb es in der Praxis nur für die Dämmung von Speicherkollektoren verwendet wird. Der typische Einsatzbereich dieses nicht konzentrierenden Systems beträgt ca. 30–120 °C.

Der Absorptionseffekt im Flachkollektor und im Röhrenkollektor ist grundsätzlich identisch. Deutliche Unterschiede bestehen bei der Wärmedämmung. Beim Röhrenkollektor ist der Absorber ähnlich wie bei einer Thermoskanne in eine evakuierte Glasröhre eingebaut. Das Vakuum besitzt gute Wärmedämmeigenschaften. Die Wärmeverluste sind daher vor allem in den Temperaturbereichen, die zur Gebäudeerwärmung oder Klimatisierung benötigt werden, geringer als bei Flachkollektoren. Bei Vakuum-Röhrenkollektoren unterscheidet man zwischen den Bauformen mit direkter Durchströmung und der „Heat-Pipe-Technik“. Beide Varianten können mit innen oder außen liegenden Reflektorflä-

chen zur Erhöhung der Energieausbeute ausgestattet sein. Häufig handelt es sich um CPC Konzentratoren mit Konzentrationsverhältnissen kleiner als 2. Vakuumröhrenkollektoren arbeiten bei erhöhtem Betriebsdruck, so dass hier Temperaturen bis ca. 150–160 °C bei guten Wirkungsgraden erzielt werden können.

Parabolrinnenkollektoren bestehen aus gewölbten Spiegeln, die das Sonnenlicht auf ein in der Fokusslinie verlaufendes Absorberrohr bündeln. Die Länge solcher Kollektoren kann je nach Bautyp zwischen 20 und 150 m liegen. In den Absorberrohren wird die konzentrierte Sonnenstrahlung in Wärme umgesetzt und an ein zirkulierendes Wärmeträgermedium abgegeben. Parabolrinnensysteme werden aus Kostengründen meist nur einachsig der Sonne nachgeführt. Sie sind deshalb in Nord-Süd-Richtung angeordnet und werden der Sonne im Tagesverlauf von Ost nach West nachgeführt. In höheren geographischen Breiten liefern Ost-West-Ausrichtungen bessere Erträge. Technisch werden im Regelfall Konzentrationsverhältnisse bis ca. 100 erzielt. Als Wärmeträgermedien kommen Wasser, Salze oder Thermoöle zum Einsatz. Letztere disproportionieren bei höheren Temperaturen, so dass auch unter Druck Temperaturen von 400 °C oft nicht überschritten werden. Fresnelkollektoren sind linienkonzentrierende Kollektoren, die nach einem ähnlichen Prinzip wie Parabolrinnensysteme arbeiten. Bezüglich der Ausrichtung und Nachführung treten daher bei beiden ähnliche Anforderungsprofile auf.

Paraboloidkollektoren bestehen aus einem rotationssymmetrischen parabolisch gekrümmten Konzentratorspiegel, der drehbar auf einem Gestell montiert wird und kontinuierlich zweiachsig der Sonne nachgeführt. Es handelt sich bei ihnen um punktkonzentrierende Systeme. Im Brennpunkt befindet sich ein Empfänger (oder Receiver), der die Strahlung absorbiert und als Hochtemperaturwärme an einen nachgeschalteten Prozess beispielsweise einen Stirling-Motor abführt. Das erzielbare Konzentrationsverhältnis bis  $10^3$  erlaubt hohe Receivertemperaturen stellt aber an den Empfänger wie auch die Nachführeinheiten hohe technische Anforderungen.

In einer Solarturmanlage richten Stellmotoren hunderte bis tausende positionierbare Spiegel, sogenannte Heliostaten, die Solarstrahlung so aus, dass das einfallende Sonnenlicht auf den zentralen Absorber, dem Receiver (Empfänger), fokussiert wird. Durch die starke Konzentration der Einstrahlung entstehen an der Spitze des Turms Temperaturen bis zu mehreren 1000 °C. Die technisch sinnvoll handhabbaren Temperaturen liegen bei rund 1400 °C. Die Konzentrationsverhältnisse können bis zu  $10^3$  betragen.

In Abhängigkeit von der Betriebstemperatur werden in den Kollektoren verschiedene Wärmeträgermedien eingesetzt. In den Schlauchmatten kann Wasser nur drucklos umgewälzt werden. Bei den Solarteichen (Solarponds) kann die Salzlösung ebenfalls direkt ohne druckführende Leitungen umgepumpt werden. Kollektorsysteme verwenden Wasser bis 150 °C, wobei über 100 °C die Kreislaufauslegung höhere Betriebsdrücke zulassen muss. In frostgefährdeten Gebieten und ganzjährigem Betrieb müssen Frostschutzmittel zugesetzt werden. Bis einige 10 °C über der Umgebungstemperatur kommt auch Luft als Wärmeträger in Betracht, sofern lediglich kleine Wärmedichten benötigt werden. Verdampfendes Wasser wurde im Wesentlichen bisher nur in Experimentieranlagen genutzt. Thermoölen, Salzschmelzen, flüssiges Metallen oder Inertgase erlauben den Betrieb



bei Temperaturen über 150 °C. Die Begrenzungen bei konzentrierenden Systemen werden hauptsächlich durch drei Aspekte bestimmt:

- den apparativen Aufwand,
- der chemischen Integrität des Wärmeübertragungsmediums (z. B. Wärmedissoziation von Ölen und Salzen bei Temperaturüberschreitung und
- dem Werkstoffverhalten bei Lastzyklen (Temperaturwechselbeanspruchung, Kriechen, Ermüden).

---

### 3.3 Prinzipieller Aufbau eines Kollektors

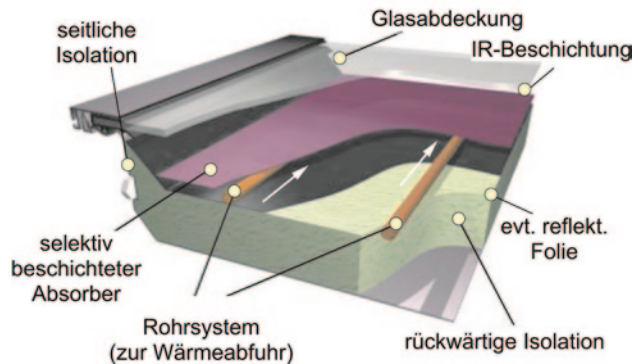
Die Abb. 3.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solarthermischen Flachkollektors zur Wärmeengewinnung. Prinzipiell besteht ein derartiger Kollektor aus:

- einer optisch transparenten Abdeckung, die der Sonne zugewandt ist. Sie gewährleistet die Transmission des Lichts zum Kollektor. Neben ihrer hohen Transparenz muss die Abdeckung die Wärmeverluste an die Umgebung klein halten.
- einer meist selektiv beschichteten Absorber- oder Empfängerplatine, die die Einstrahlung absorbiert,
- einem Wärmeabfuhrsystem, das die Wärme vom Absorber aufnimmt und aus dem Kollektor transportiert,
- einer thermischen Isolierung an den nicht Exergie aufnehmenden Seiten des Kollektors und
- einer Umschließung, in die die optisch transparente Abdeckung integriert ist. Ihre Aufgabe besteht zum einen in der Reduktion der konvektiven Wärmeübertragung im Kollektor und der Wärmeverluste an die Umgebung. Zum anderen soll sie einen Schutz gegen Verschmutzung und mechanische Beanspruchung bieten und die Fixierung des Kollektors sowie der damit verbundenen Komponenten sichern.

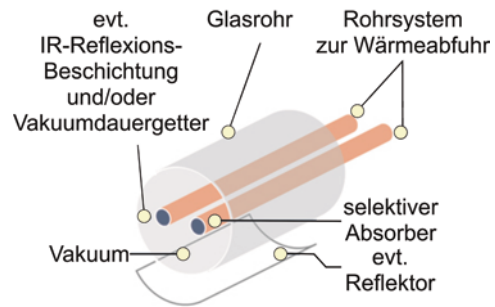
Die Umschließung ist beim Flachkollektor ein Kasten, der auf der Frontseite durch eine Glasscheibe abgedeckt ist. Flachkollektoren nutzen als Wärmeträgermedium zum Transport der Wärme aus dem Kollektor zumeist Wasser (je nach Region mit oder ohne Frostschutzmittel) oder Luft. Hierzu sind Kanäle oder Rohre am Absorber angebracht, die die im Kollektor aufgefangene Wärme an das Wärmeträgermedium transferieren. Häufig handelt es sich um mehrere parallele Rohre, die durch Verteiler- und Sammelleitungen mit dem externen Rohrleitungsnetz (z. B. Heizkreislauf oder Nachbarkollektor) verbunden sind (eine detailliertere Beschreibung erfolgt in Kap. 6.2.2).

Ein Röhrenkollektor besteht aus einer evakuierten Glasröhre, in deren Inneren sich entweder mit dem Wärmeträgerfluid gefüllte Absorberrohre (vgl. Abb. 3.4) oder streifenförmige Absorberplatinen mit daran befestigten Rohren zur Wärmeabfuhr befinden.

**Abb. 3.3** Schematische Darstellung des Aufbaus eines Flachkollektors mit den wichtigsten Komponenten



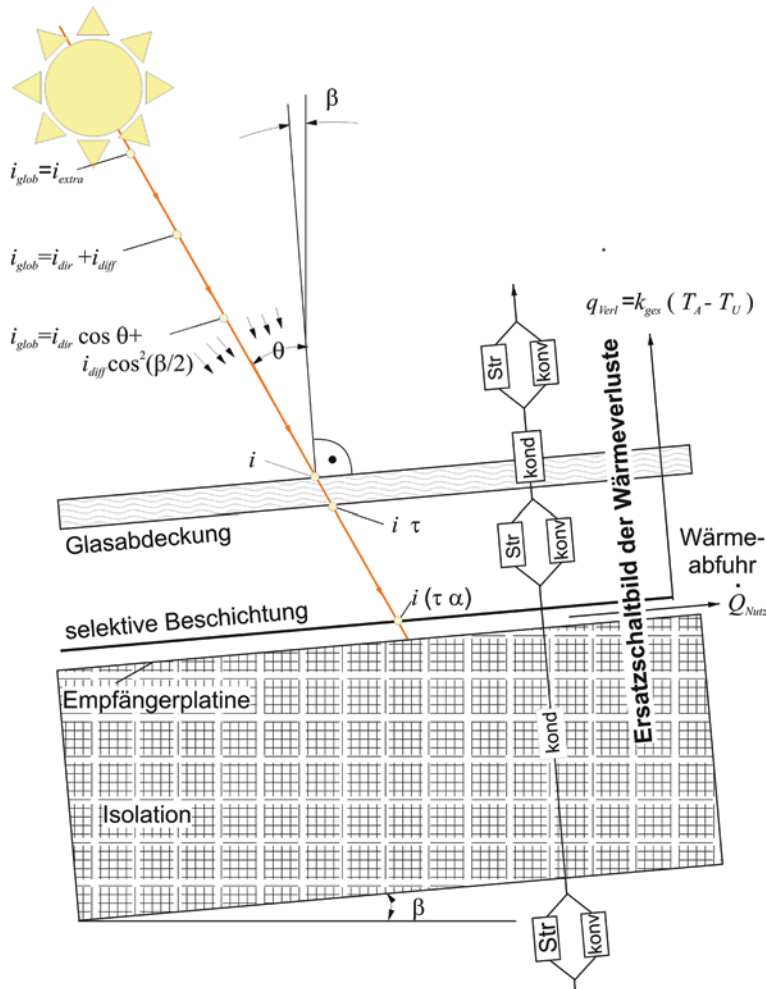
**Abb. 3.4** Schematische Darstellung des Aufbaus eines Röhrenkollektors und seiner zentralen Bauelemente



Andere Systeme verfügen auch über konzentrisch zum Glasrohr angeordnete Absorberrohre, in deren Inneren die Wärmeabfuhrrohre entweder als U-Rohr oder „heat pipe“ angeordnet sind.

Mit einer vakuumdichten Verbindung zwischen den Metallrohren und dem umschließenden Glasrohr kann das Innere der Glasröhre evakuiert werden. Das Vakuum isoliert den Absorber thermisch gegen das Glasrohr. Eine langfristig vakuumdichte Verbindung zwischen dem Glasrohr und dem metallischen Absorber ist eine der zentralen Herausforderungen. Gelegentlich enthalten die Glasrohre einen Getter. Dieser kann induktiv von außen erhitzt werden, um so im Laufe der Standzeit das Vakuum wieder herstellen zu können. Eine weitere Lösung ist ein doppeltes Glasrohr mit dem Vakuum im Zwischenbereich ähnlich dem Prinzip einer Thermoskanne. Der Absorber befindet sich innerhalb des inneren Glasrohres. Der Absorberquerschnitt ist deutlich kleiner als das äußere Glasrohr, so dass die nutzbare, absorbierende Fläche deutlich kleiner als die Kollektorfläche ist. Das doppelte Glasrohr reduziert allerdings den optischen Wirkungsgrad.

Unabhängig vom Kollektorkonzept können mit Hilfe konzentrierender Spiegel, die auf die Absorberfläche gerichtet sind die Einstrahlungsleistung gegenüber der unmittelbar auf den Absorber eines Kollektor treffenden Strahlung erhöhen (vgl. Abschn. 2.3.10.4).



**Abb. 3.5** Schemaskizze eines Flachkollektors mit Glasabdeckung, einer Absorber- (oder Empfänger-) platine und dem daran befestigten Wärmeabfuhrrohr; die Wärmeverluste lassen sich als Anteile der Verluste durch Strahlung (Str), Wärmeleitung (kond), Konvektion (konv) mit Hilfe eines elektrischen Ersatzschaltbildes darstellen

### 3.4 Wirkungsgrad nichtkonzentrierender Solarkollektoren

Die Nutzleistung  $\dot{q}_N$  und damit der zugehörige Wirkungsgrad  $\eta$  eines Solarkollektors ergibt sich aus einer Wärmebilanz. Zur Erstellung einer vollständigen Wärmebilanz dient die Abb. 3.5. Die flächenbezogene Nutzleistung  $\dot{q}_N$  auf einen geeigneten Flachkollektor ergibt sich damit aus der Bilanz der spezifischen Einstrahlung  $i$  (in  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ) abzüglich der optischen Verluste durch Transmission ( $\tau$ ) und Absorption ( $\alpha$ ) und der thermischen Verluste,

Thermische Solarenergie

Grundlagen, Technologie, Anwendungen

Stieglitz, R.; Heinzel, V.

2012, XV, 703 S. 471 Abb., 10 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-29474-7