
Das Bruttowärmeertragsmodell "BWE 91"

Validierung 1992/93

R. Frey / U. Frei

SPF-ITR
Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle
Ingenieurschule ITR
CH-8640 Rapperswil

<u>Inhalt :</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	2
1.1 Allgemeines	2
1.2 Änderungen im Modell	2
1.3 Erklärung des "BWE 91"-Modells	3
2. Validierung des Modells	6
2.1 Vorgehen	6
2.2 Messinstallationen	8
3. Resultate	8
3.1 Strahlungsumrechnung	8
3.2 Bruttowärmeertrag	15
3.3 BWE für den Vakuumröhrenkollektor (Vergleich der BWE's mit zwei unterschiedlich eingesetzten Diffuswirkungsgraden)	25
3.4 Auswirkungen von Stundenwert-Meteodaten auf die Validierungsergebnisse	27
4. Schlussbemerkungen	34
5. Literaturhinweise	34

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Für die Auslegung von Sonnenenergieanlagen ist die Kenntnis des zu erwartenden Energieertrags der Kollektoren Voraussetzung. Das Bruttowärmeertragsmodell "BWE 91" dient als Instrument, um diesen Kollektorertrag zu berechnen. Der Einsatz des Modells beschränkt sich aber nur auf den Kollektor, ist also nicht in der Lage, den Systemertrag einer Sonnenenergieanlage zu simulieren.

Der Kollektorertrag hängt vom Strahlungsangebot ab, welches stark mit der Jahres- und der Tageszeit, sowie mit der jeweiligen Wetterlage schwankt. Die auf die Kollektorebene auftreffende Strahlung wird mit einem bestimmten Wirkungsgrad in Wärme umgewandelt, der seinerseits von den meteorologischen Grössen (Einstrahlung, Aussentemperatur, Windgeschwindigkeit, etc.), von der Betriebstemperatur und den optischen und thermischen Eigenschaften des Kollektors abhängig ist.

In der Praxis ist der zu erwartende BWE über eine längere Zeitperiode (Monat, Jahr) bei verschiedenen Orientierungen, Anstellwinkeln und Betriebstemperaturen der Kollektoren von Interesse. Wegen der starken Schwankungen des Wetterverlaufs von Jahr zu Jahr, müssen für eine Abschätzung des Ertrags gemessene Meteorodaten über mehrere Jahre herangezogen werden. Somit ergeben sich mittlere Ertragsrichtwerte über diese Jahre.

Die Grundlagen des von uns eingesetzten Bruttowärmeertragsmodells wurden am Paul Scherrer Institut (vormals EIR) durch P. Ambrosetti und J. Keller erarbeitet. Die detaillierte Beschreibung des Modells ist in /1/ zu finden.

1.2 Änderungen im Modell

Als Input-Parameter für das Programm der Version Ambrosetti/Keller dienen die Kollektorkennwerte entsprechend der Norm SN-165001/1, die aus verschiedenen Gründen heute nicht mehr angewendet wird. Es galt deshalb das vorhandene Modell auf die neuen Input-Parameter, bestimmt nach der Norm ISO 9806-1 (beschrieben im Teil 1 und 3 des vorliegenden Ordners), anzupassen. In dankenswerter Weise hat sich P. Bremer, SEDE SA Vevey, diesen Modifikationen angenommen und zusätzlich folgende Verbesserungen implementiert :

- Einbindung des Modells von R. Perez /2/, das sehr fortschrittlich die räumliche Verteilung der Diffusstrahlung abschätzt. Insbesondere wird die Helligkeit der Sonnenscheibe, sowie die Helligkeit des Horizonts berücksichtigt.
- Einbindung von monatlichen Albedo-Werten (Reflexionsvermögen des Bodens) nach D. Bruewiler. Die Berechnung basiert auf einer Korrelation eines Mittelwertes einer Anzahl Tage mit permanentem Schnee pro Monat in Funktion der Höhe (Altitude).
- Vereinfachung der Berechnung der Sonnenposition nach P. Ineichen /3/.

- Für die Funktion des Winkelfaktors ("Incident Angle Modifier") werden anstelle von festen Vorgaben für die verschiedenen Kollektorkonstruktionen, neu die Messresultate des entsprechenden Kollektors eingesetzt. Insbesondere wird, wenn nötig (z.B. bei Röhrenkollektoren), der biaxiale Winkelfaktor berücksichtigt.

All diese Modelländerungen machten eine erneute Validierung notwendig.

1.3 Erklärung des "BWE 91"-Modells

Die Kennwerte c_0 , c_1 , c_2 und K_{CH} , die bei der Wirkungsgradbestimmung nach der ISO-Norm ermittelt wurden, dienen als Eingabe-Parameter für das Rechenprogramm.

Dabei beschreibt c_0 näherungsweise den optischen Wirkungsgrad des Kollektors. Denn auch wenn dieser bei Umgebungstemperatur betrieben wird, treten je nach Kollektorkonstruktion geringe thermische Verluste auf, zudem wird die einfallende Sonnenstrahlung nicht vollständig in Wärme umgewandelt. Zuerst treten beim Durchgang der Strahlung durch die Kollektorabdeckung Transmissionsverluste auf, die einerseits vom Einfallswinkel der Strahlung und andererseits vom Material und der geometrischen Verhältnisse der Abdeckung abhängen. Im Weiteren wird nicht alle, auf den Absorber auftreffende, Strahlung absorbiert. Diese Verluste sind vom Absorptionsgrad der Beschichtung abhängig. Schliesslich treten noch Wärmeübergangsverluste vom Absorber zum Wärmeträgermedium auf, die von der Geometrie und vom Absorbermaterial abhängen.

Die Parameter c_1 und c_2 charakterisieren die vorhandenen thermischen Verluste (Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung) entsprechend der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung.

Da in der Praxis der Kollektor z.B. auf einem Hausdach fest installiert ist, d.h. der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf die Kollektorfläche und somit auch der optische Wirkungsgrad sich dauernd ändert, ist die Kenntnis des Verlaufs des Winkelfaktors unerlässlich.

Der Winkelfaktor oder "Incident Angle Modifier (IAM)" gibt das Verhältnis des optischen Wirkungsgrades bei aktuellem Einfallswinkel, zu demjenigen bei senkrechtem Einfall der Strahlung an. Bei der Wirkungsgradbestimmung wird der Winkelfaktor K_{CH} bei einer Winkelabweichung von $\varphi=50^\circ$ zur Senkrechten gemessen. Dieser Wert wird dann ins "BWE 91"-Programm eingegeben. Im Bruttowärmeertragsmodell sind für die gängigsten Kollektortypen Funktionen enthalten, die den Verlauf des Winkelfaktors wiedergeben. Diese Funktionen wurden durch Messungen verschiedener Kollektoren ermittelt.

Für Kollektorsonderbauarten wird beim Leistungstest der ganze IAM-Verlauf aufgenommen und im "BWE 91"-Modell implementiert.

Auf der nächsten Seite sind die typischen Verläufe des Winkelfaktors angegeben :

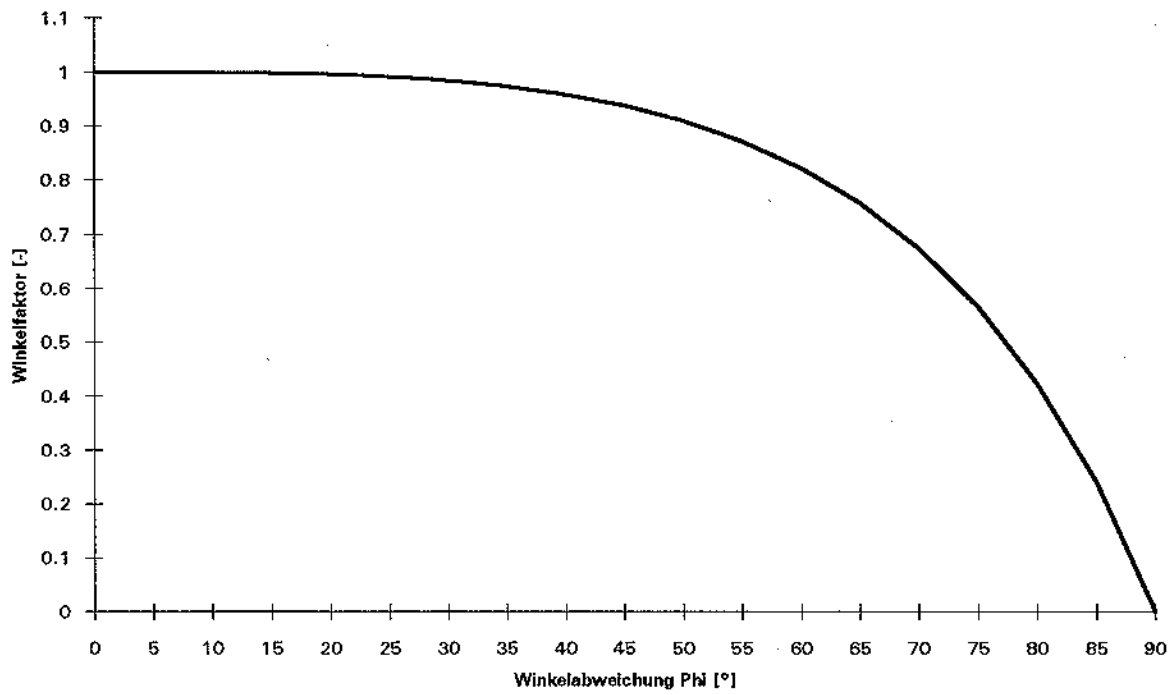


Fig. 1 : Verlauf des Winkelfaktors beim Flachkollektor

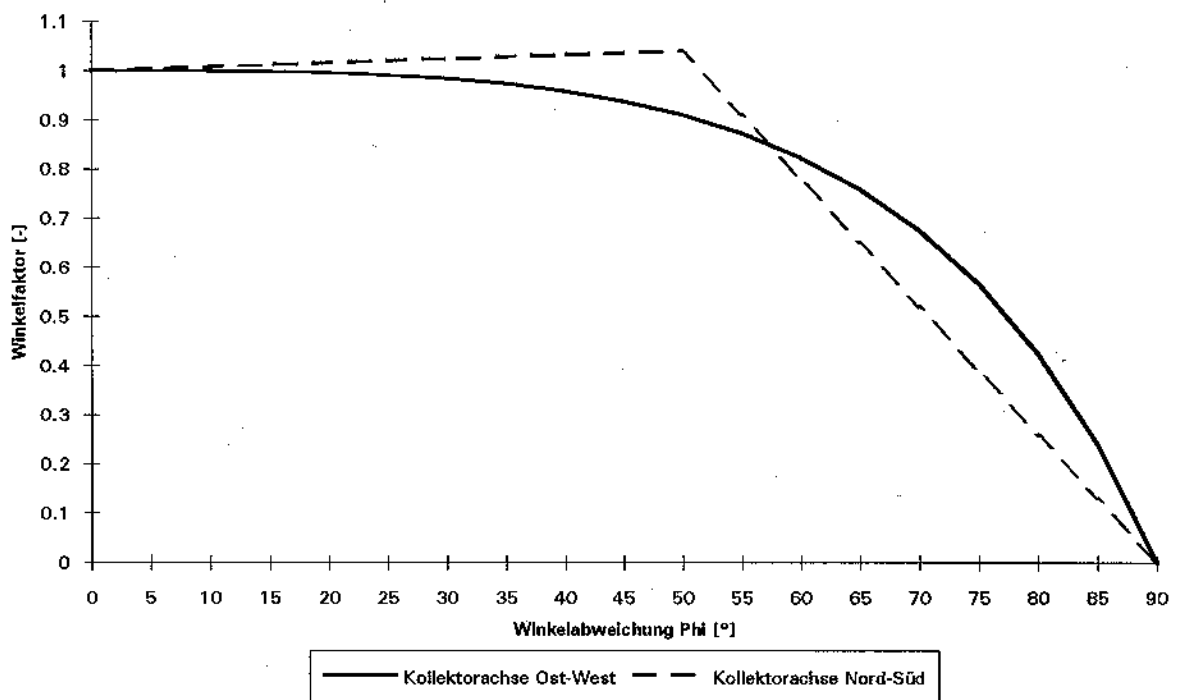


Fig. 2 : Verlauf des Winkelfaktors beim Vakuumröhrenkollektor

Allen Berechnungen liegen Meteodatensätze mit stündlichen Werten der Global- und Diffusstrahlung in die Horizontale, sowie der Aussentemperatur für die Jahre 1963 bis 1970 zugrunde. In diesem Zeitraum von 8 Jahren sind die Datensätze, welche von der SMA (Schweizerische Meteorologischen Anstalt) zur Verfügung gestellt wurden, für die drei Messstationen Kloten, Locarno und Davos vollständig. Somit sind drei charakteristische Klimazonen (Mittelland, Alpensüdseite und Alpen) vertreten.

Die in den BWE-Tabellen aufgelisteten Globalstrahlungswerte, sowie die berechneten Kollektorserträge sind also Durchschnittswerte über diese Zeitperiode von 8 Jahren.

Bei der Berechnung des BWE's wird zuerst für jeden Zeitpunkt (Stundenintervalle) das Strahlungsangebot von der Horizontalen auf die gewünschte Orientierung und Neigung der Kollektorfläche umgerechnet. Mit der Berücksichtigung des optischen Wirkungsgrades c_0 und des Winkelfaktors ergibt sich der Ertrag ohne die noch abzuziehenden Wärmeverluste des Kollektors.

Durch Subtraktion der durch c_1 und c_2 charakterisierten Wärmeverluste, erhält man den Kollektorsertrag für eine gewünschte Kollektormitteltemperatur, abhängig von der jeweiligen Aussentemperatur.

Das Programm liefert als Output z.B. folgende Tabelle :

Bruttowärmeertrag für den Standort Kloten

Kollektor Parameter : $c_0 = 0.8000 [-]$ $c_1 = 4.000 [W/m^2K]$ $c_2 = 0.005 [W/m^2K^2]$ $K_{CH} = 0.92 [-]$

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	%
Global														
GK 30°/0°														
BWE (30°C)														
BWE (40°C)														
BWE (50°C)														
BWE (100°C)														
GK 45°/0°														

u. S. W.

Legende : Global = Globalstrahlung auf Horizontalfläche [kWh/m² Absorberfläche]
 GK = Globalstrahlung auf Kollektorfläche, Neigung / Azimut [kWh/m² Absorberfläche]
 BWE (T_m) = Ertrag bei mittlerer Kollektortemperatur T_m [kWh/m² Absorberfläche]
 % = mittlerer Jahreswirkungsgrad in [%]

2. Validierung des Modells

2.1 Vorgehen

Als Testkollektoren dienen ein Flach- sowie ein Vakuumröhrenkollektor, die schon lange als Referenzkollektoren für die Messungen des Wirkungsgrades im Einsatz stehen. Die Kennwerte sind also bestens bekannt, wurden trotzdem während der Validierungsphase regelmässig überprüft. Damit sind exakte Eingabe-Parameter gewährleistet.

Kollektorkennwerte :

Kollektorkennwerte	Flachkollektor	Vakuumröhrenkollektor
c_0 [-]	0.7793	0.7609
c_1 [W/m ² K]	3.35	0.85
c_2 [W/m ² K ²]	0.013	0.014
η_{CH} [-]	0.779	0.761
$\eta_{0,05}$ [-]	0.585	0.691
$\eta_{0,1}$ [-]	0.338	0.567
K_{CH1} [-]	0.92	0.92
K_{CH2} [-]	0.92	1.04

Erklärung der Kennwerte : siehe Teil 1 des vorliegenden Ordners.

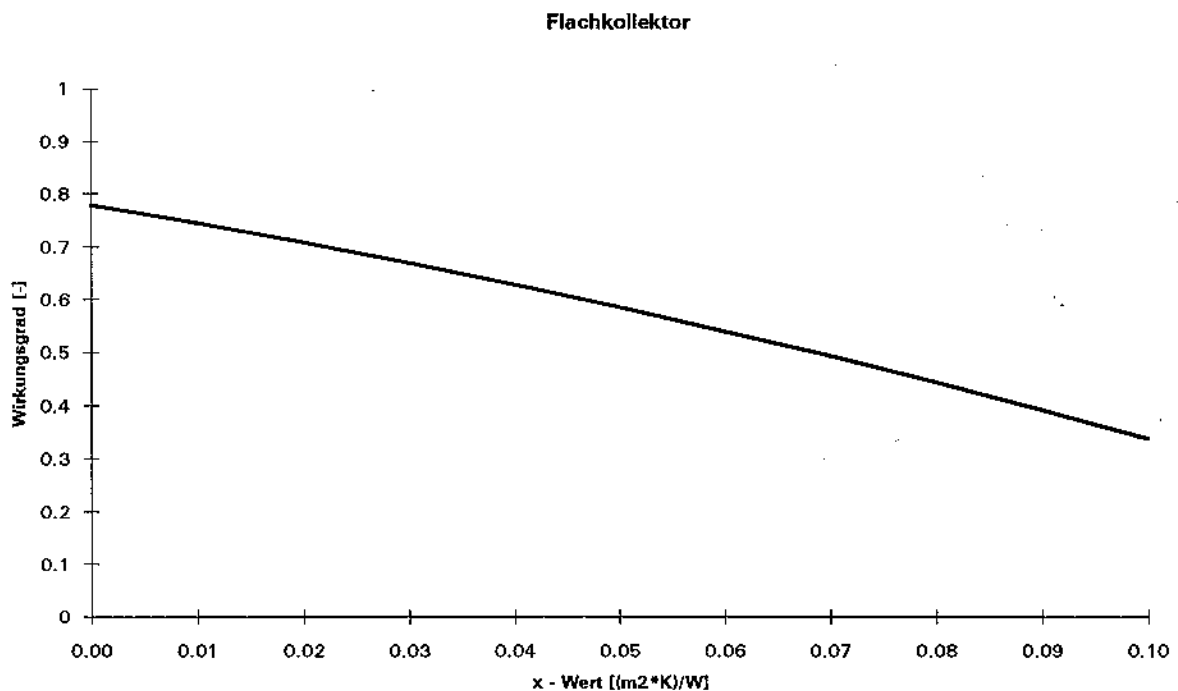


Fig. 3 : Jahreszeitlich korrigierte Wirkungsgradkennlinie bezogen auf die Absorberfläche, für die globale Einstrahlung in die Kollektorebene von 800 W/m²

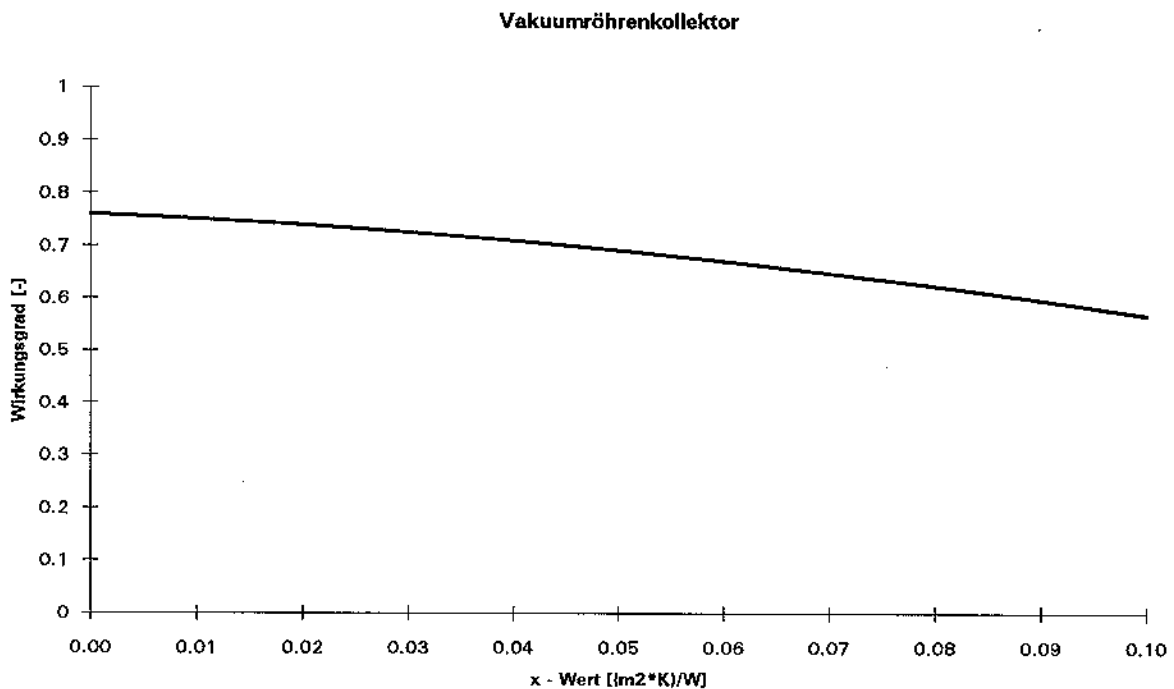


Fig. 4 : Jahreszeitlich korrigierte Wirkungsgradkennlinien bezogen auf die Absorberfläche, für die globale Einstrahlung in die Kollektorebene von 800 W/m^2

Das Modell wurde bei verschiedenen Orientierungen, Anstellwinkeln und Mitteltemperaturen der Testkollektoren messtechnisch überprüft. Für jede Stellung wurde je ein Tag bei schönem, wechselhaftem und schlechtem Wetter gemessen. Die Messperiode betrug üblicherweise acht Stunden.

Die Messwerte für die Ertragsrechnung (Volumenstrom, Ein- und Austrittstemperaturen), sowie die Meteodaten (Aussentemperatur, Global- und Diffusstrahlung in die Horizontale und in die Kollektorebene) wurden alle 30 Sekunden gemessen und in 2-Minuten-Mittelwerten auf einen Datensatz abgespeichert. Somit kann die Rechnung direkt mit der Messung verglichen werden.

Da im Bruttowärmeertragsmodell jedoch auf Meteodatensätze zugegriffen wird, bei denen Stundenmittelwerte abgespeichert sind, wurden für neun Fälle die gemessenen Meteodaten zusätzlich stündlich aufintegriert und gemittelt. Die so erhaltenen Stundenmittelwerte wurden ebenfalls auf einen Datensatz abgespeichert. Somit kann das Modell in seiner wahren Arbeitsweise überprüft werden.

Einen Vergleich von BWE's, berechnet mit 2-Minuten- und Stundenmittelwerten, ist in Kapitel 3.4 zu sehen.

2.2 Messinstallationen

Um den Kollektorertrag zu messen wurde dieselbe Instrumentierung eingesetzt wie bei der Wirkungsgradmessung (beschrieben im Teil 1).

Zusätzlich wurden folgende Messinstrumente benützt :

- Pyranometer Kipp&Zonen CM11 für die Messung der Globalstrahlung in die Kollektorebene.
- Pyranometer mit Schattenring Kipp&Zonen CM11/121 für die Diffusstrahlungsmessung in die Kollektorebene. Zusätzlich zur Elevationseinstellung ist bei diesem Gerät auch die Azimutabweichung manuell einstellbar.
- Pyranometer Kipp&Zonen CM11 für die Messung der Globalstrahlung in die Horizontale.
- Pyranometer mit Schattenring Epply PSP für die Diffusstrahlungsmessung in die Horizontale.

Alle Pyranometer wurden gegeneinander geeicht. Da der Schattenring der Diffusstrahlungsmessinstrumente einen Teil des Raumwinkels abdeckt, wurde eine Schattenringkorrektur für diese Geräte angewendet.

3. Resultate

Alle folgenden Validierungsergebnisse basieren, wenn nichts anderes erwähnt, auf 2-Minuten-Mittelwerten, gebildet aus vier Messungen.

3.1 Strahlungsumrechnung

In einem ersten Schritt wird die Strahlungsumrechnung von der Horizontalen in die Kollektorebene überprüft.

Dabei werden die folgenden Kurzzeichen verwendet :

IGK m :	Gemessene Globalstrahlung in die Kollektorebene
IDK m :	Gemessene Diffusstrahlung in die Kollektorebene
IGK r :	Gerechnete Globalstrahlung in die Kollektorebene
IDK r :	Gerechnete Diffusstrahlung in die Kollektorebene

Zusätzlich wird die Abweichung von den gerechneten Werten zu den gemessenen Werten angegeben.

Beispiel :

$$\text{Abweichung [Wh/m}^2\text{]} = \text{IGK r} - \text{IGK m}$$

$$\text{Abweichung [\%]} = (\text{IGK r} / \text{IGK m} - 1) * 100$$

Orientierung [°]	Neigung [°]	IGK r [Wh/m ²]	IGK m [Wh/m ²]	Abweichung [Wh/m ²]	Abweichung [%]
0	0	905.4	905.4	0.0	0.0
0	0	2997.4	2997.4	0.0	0.0
0	0	4944.9	4944.9	0.0	0.0
0	0	5341.0	5341.0	0.0	0.0
0	30	914.8	900.6	14.2	1.6
0	30	1285.5	1231.8	53.7	4.4
0	30	4588.4	4694.0	-105.6	-2.2
0	30	4783.5	4737.5	46.0	1.0
0	45	1485.6	1437.5	48.1	3.3
0	45	3533.3	3536.3	-3.0	-0.1
0	45	3609.4	3539.3	70.1	2.0
0	45	4326.8	4405.8	-79.0	-1.8
0	45	4613.4	4810.1	-196.7	-4.1
0	45	5306.7	5318.5	-11.8	-0.2
0	60	1912.0	1774.1	137.9	7.8
0	60	3528.5	3437.9	90.6	2.6
0	60	4414.7	4315.6	99.1	2.3
0	60	6827.5	6706.1	121.4	1.8
0	90	2183.6	2114.1	69.5	3.3
0	90	4567.8	4533.3	34.5	0.8
0	90	5022.9	4699.3	323.6	6.9
30	30	990.6	949.4	41.2	4.3
30	30	1648.2	1562.3	85.9	5.5
45	60	3613.3	3490.3	123.0	3.5
45	60	3707.1	3608.5	98.6	2.7
45	60	4602.5	4559.3	43.2	0.9
-30	0	730.5	757.5	-27.0	-3.6
-30	0	1020.3	1058.1	-37.8	-3.6
-30	0	4626.9	4682.5	-55.6	-1.2
-30	30	432.4	429.6	2.8	0.7
-30	30	1430.0	1443.5	-13.5	-0.9
-30	30	1569.6	1568.9	0.7	0.04
-30	30	1657.2	1723.9	-66.7	-3.9
-30	30	3488.2	3534.9	-46.7	-1.3
-30	45	1130.8	1078.7	52.1	4.8
-30	45	2022.6	2137.5	-114.9	-5.4
-30	45	3532.7	3731.4	-198.7	-5.3
-45	30	561.1	562.8	-1.7	-0.3
-45	30	684.7	682.5	2.2	0.3
-45	30	795.3	806.9	-11.6	-1.4
-45	30	5492.3	5944.2	-451.9	-7.6
-45	30	5550.7	5508.9	41.8	0.8
-45	45	533.7	518.2	15.5	3.0
-45	45	1843.2	1777.9	65.3	3.7
-45	45	2150.6	2178.0	-27.4	-1.3
-45	45	5747.4	5702.1	45.3	0.8
-45	60	935.4	867.6	67.8	7.8
-45	60	1018.4	943.5	74.9	7.9
-45	60	4136.0	4144.2	-8.2	-0.2
-45	60	4490.7	4463.3	27.4	0.6

Fig. 5 : Umrechnung der Globalstrahlung von der Horizontalen in die Kollektorebene

Orientierung [°]	Neigung [°]	IDK r [Wh/m ²]	IDK m [Wh/m ²]	Abweichung [Wh/m ²]	Abweichung [%]
0	0	834.2	834.2	0.0	0.0
0	0	1469.3	1469.3	0.0	0.0
0	0	1604.7	1604.7	0.0	0.0
0	0	1403.8	1403.8	0.0	0.0
0	30	867.9	900.8	-32.9	-3.7
0	30	1164.0	1200.9	-36.9	-3.1
0	30	2072.2	2112.9	-40.71	-1.9
0	30	1694.8	1622.1	72.7	4.5
0	45	1395.9	1468.9	-73.0	-5.0
0	45	1565.4	1581.3	-15.9	-1.0
0	45	2015.0	1966.0	49.0	2.5
0	45	1668.0	1697.3	-29.3	-1.7
0	45	2012.5	2190.1	-177.6	-8.1
0	45	1613.1	1572.3	40.85	2.6
0	60	1271.0	1137.1	133.9	11.8
0	60	1264.5	1186.6	77.9	6.6
0	60	1387.6	1307.1	80.5	6.2
0	60	1436.2	1423.7	12.5	0.9
0	90	1338.6	1315.8	22.8	1.7
0	90	1675.1	1630.8	44.3	2.7
0	90	1259.6	1211.5	48.1	4.0
30	30	915.2	946.4	-31.3	-3.3
30	30	1499.0	1499.1	-0.1	0.0
45	60	1949.7	1832.7	117.0	6.4
45	60	1744.5	1635.2	109.3	6.7
45	60	1709.0	1709.8	-0.8	-0.1
-30	0	735.5	804.0	-68.5	-8.5
-30	0	973.2	1058.1	-84.9	-8.0
-30	0	1105.3	1202.5	-97.2	-8.1
-30	30	404.6	432.3	-27.7	-6.4
-30	30	1304.5	1345.6	-41.1	-3.1
-30	30	1340.8	1384.6	-43.8	-3.2
-30	30	864.9	933.1	-68.2	-7.3
-30	30	1751.0	1847.9	-97.0	-5.2
-30	45	986.1	941.4	44.7	4.7
-30	45	1196.9	1243.3	-46.4	-3.7
-30	45	1282.1	1389.0	-106.9	-7.7
-45	30	518.5	579.5	-61.0	-10.5
-45	30	633.3	698.6	-65.3	-9.3
-45	30	729.8	809.0	-79.2	-9.8
-45	30	1937.8	1996.3	-58.5	-2.9
-45	30	1269.3	1351.2	-81.9	-6.1
-45	45	486.0	551.9	-65.9	-11.9
-45	45	1362.3	1448.1	-85.8	-5.9
-45	45	1597.2	1667.5	-70.3	-4.2
-45	45	2204.7	2429.2	-224.5	-9.2
-45	60	868.8	856.7	12.1	1.4
-45	60	923.9	913.2	10.7	1.2
-45	60	1522.6	1513.5	9.1	0.6
-45	60	1857.7	1934.8	-77.1	-4.0

Fig. 6 : Umrechnung der Diffusstrahlung von der Horizontalen in die Kollektorebene

• **Graphische Darstellung der Messergebnisse**

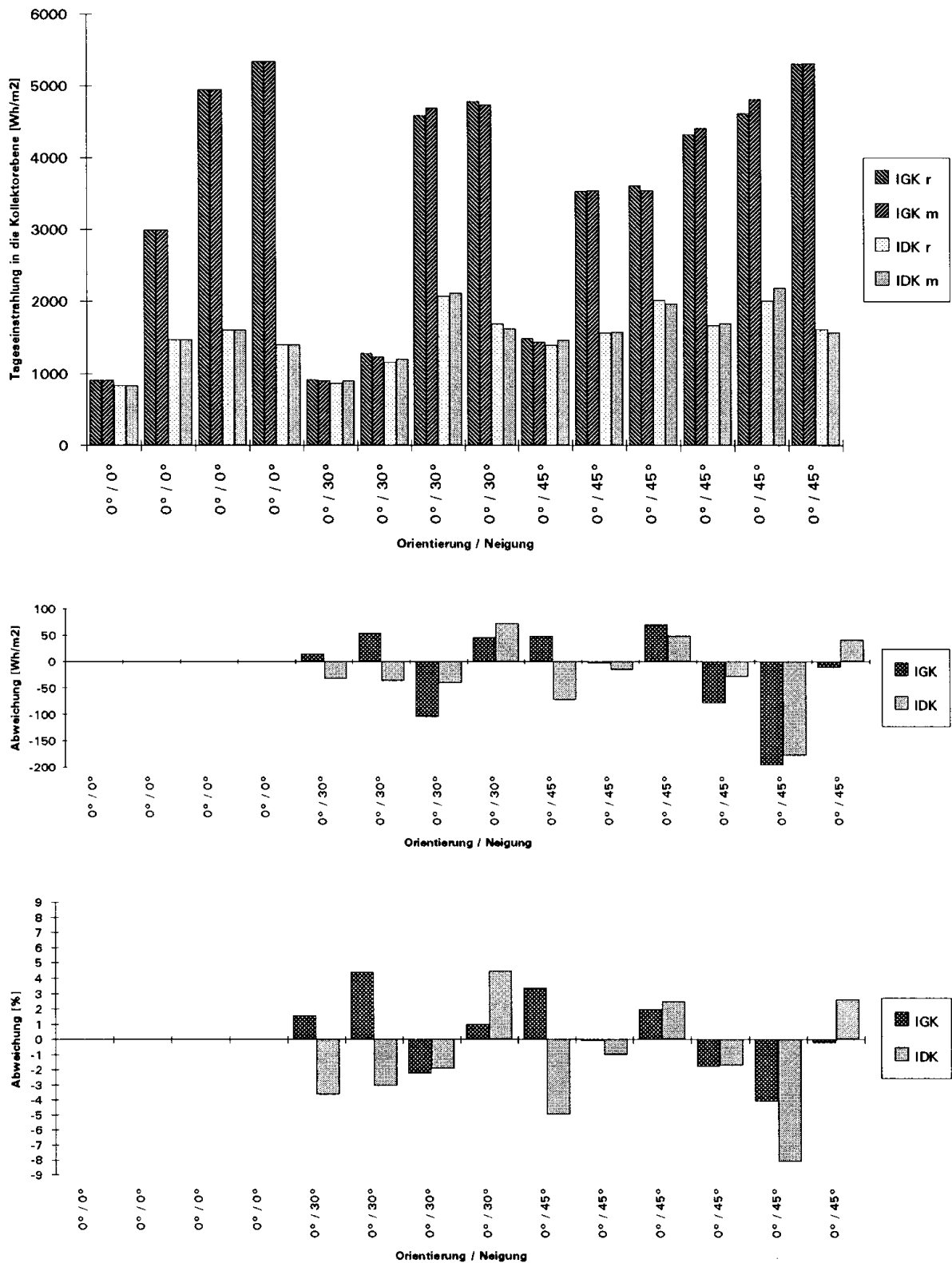


Fig. 7 : Gemessene und berechnete Tagessummen

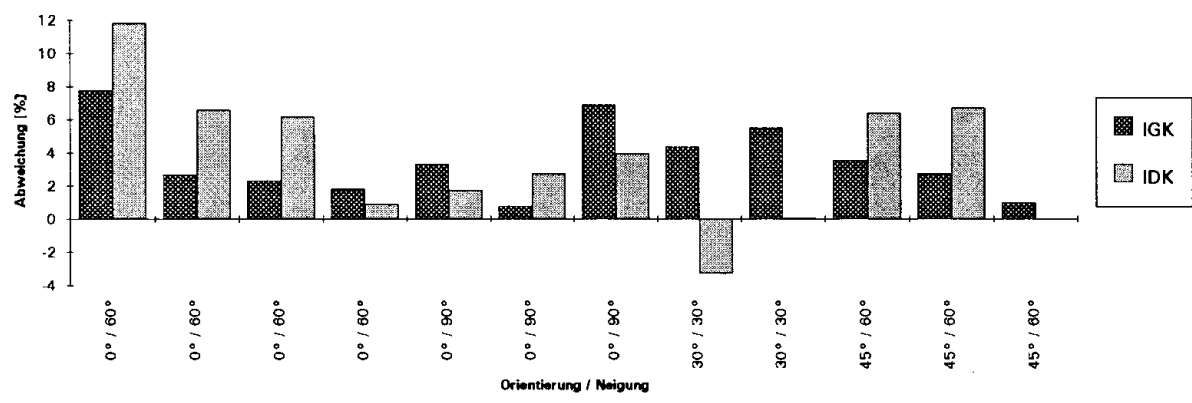
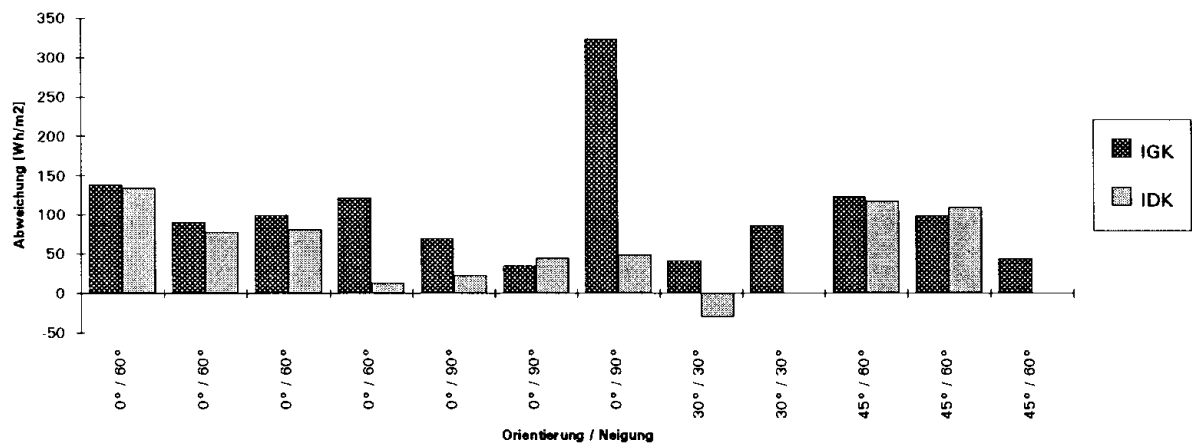
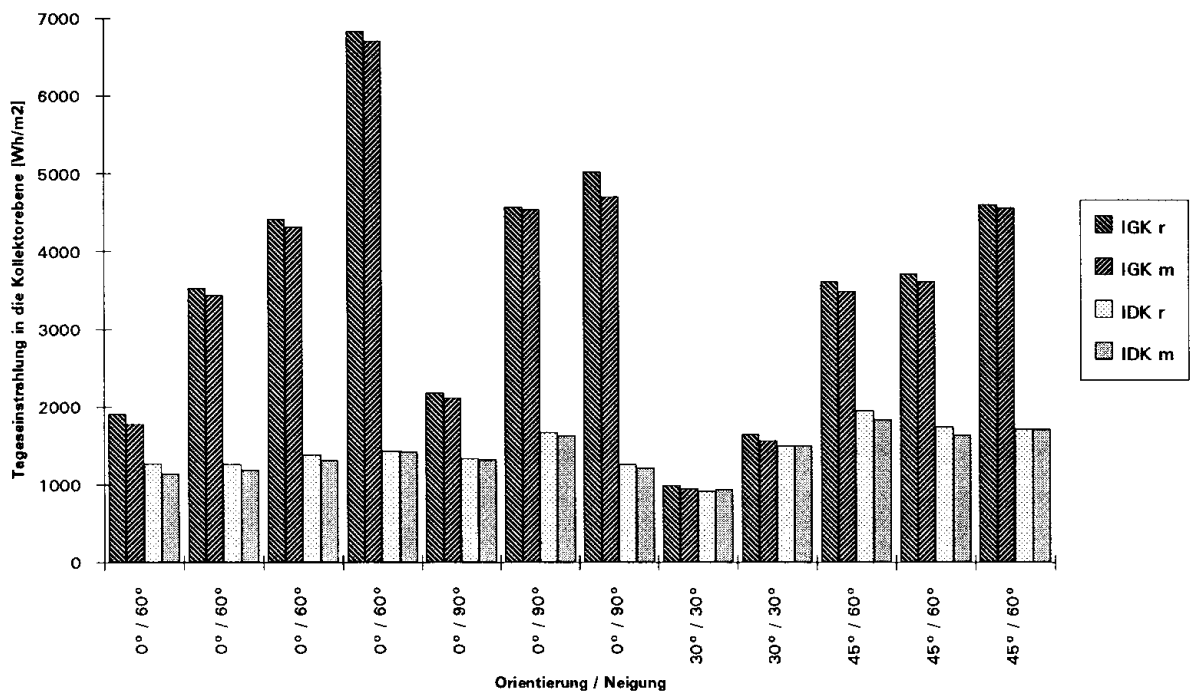


Fig. 8 : Gemessene und berechnete Tagessummen

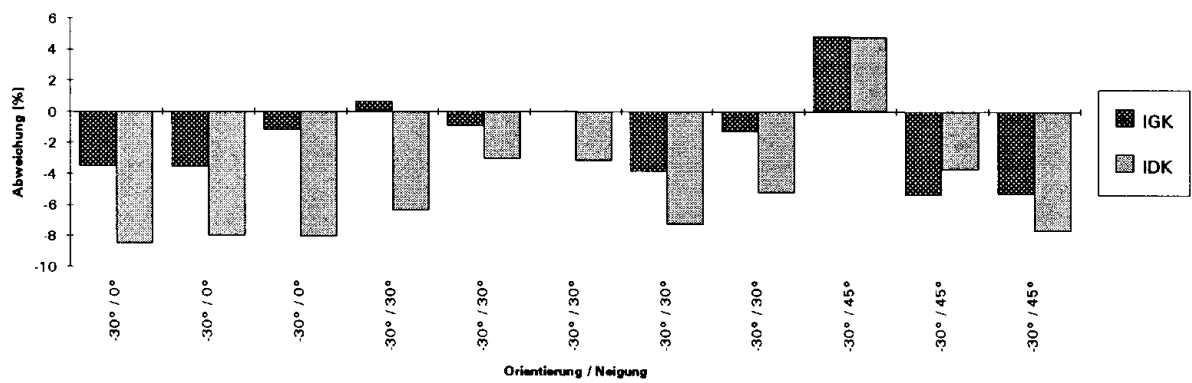
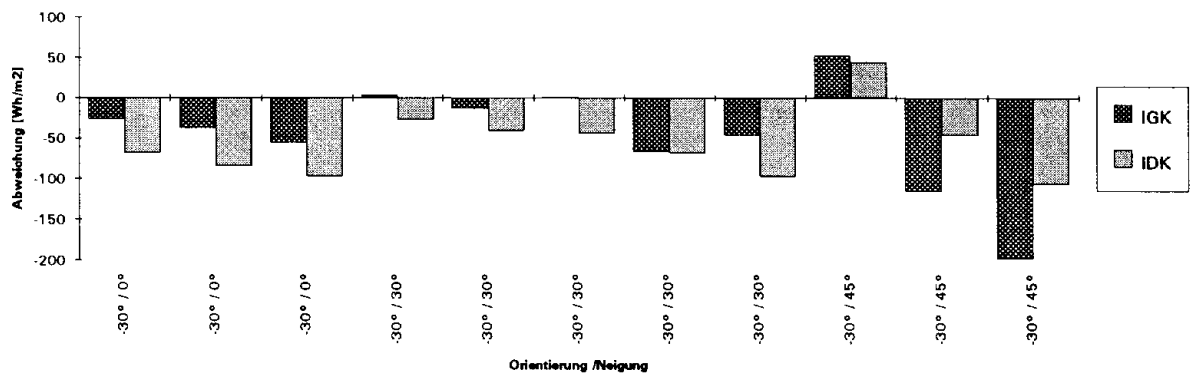
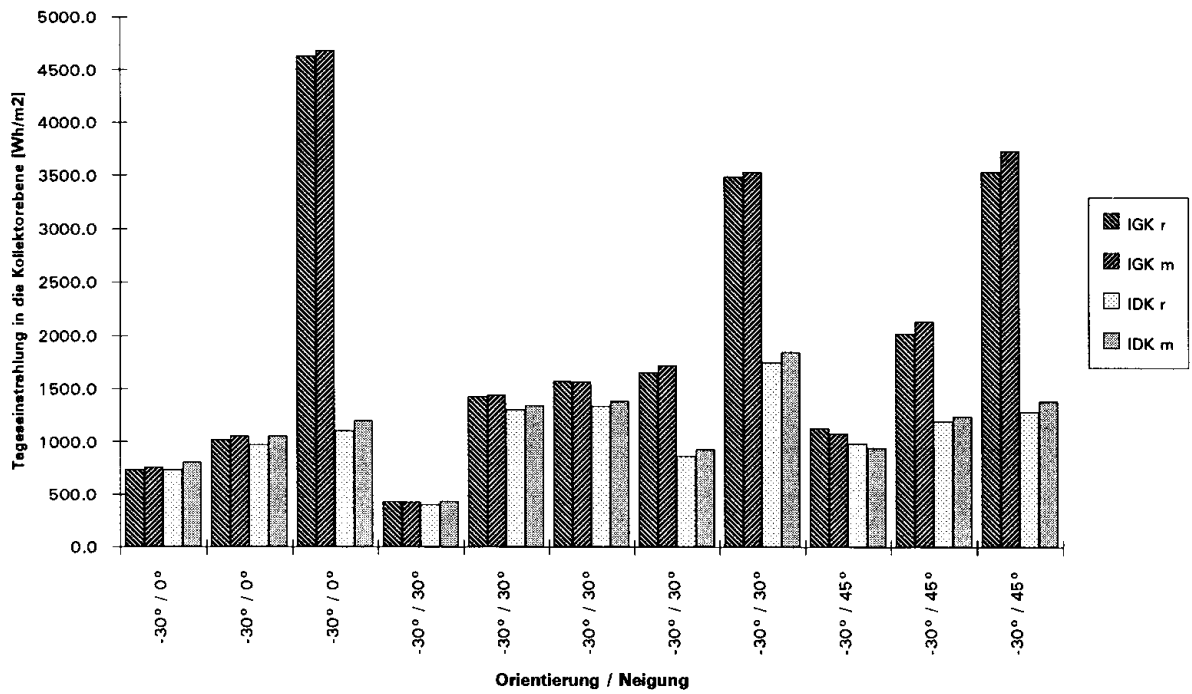


Fig. 9 : Gemessene und berechnete Tagessummen

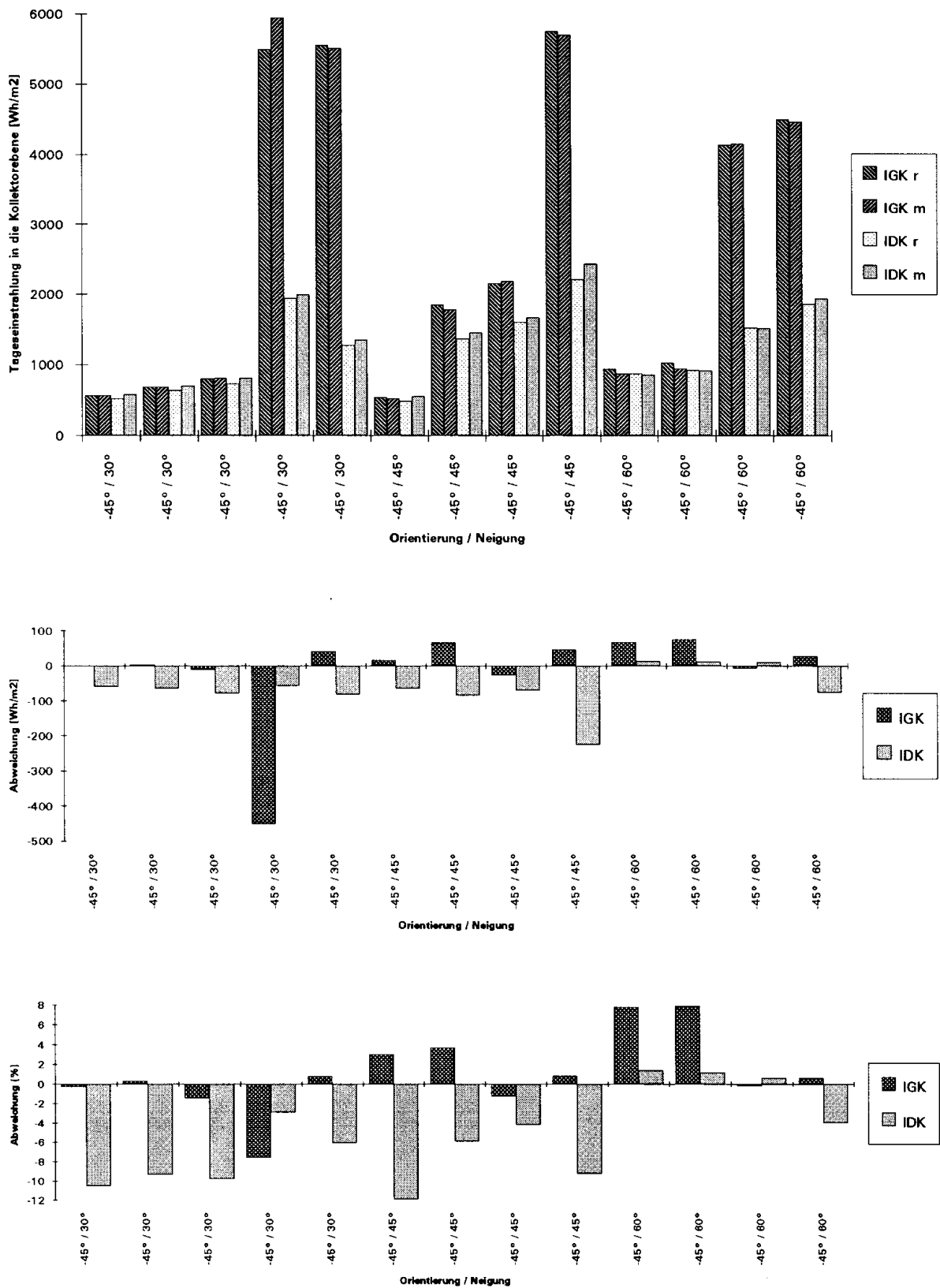


Fig. 10 : Gemessene und berechnete Tagessummen

• Diskussion der Resultate

Die Umrechnung der Globalstrahlung von der Horizontalen in die Kollektorebene erfolgt befriedigend. Die maximale Abweichung beträgt nur 7.9 %. Zudem wurde diese an einem Tag mit niedriger Einstrahlung (max. 300 W/m²) gemessen. In diesem Strahlungsbereich ist die Messgenauigkeit der Pyranometer weniger hoch als bei hohen Strahlungsintensitäten.

Die Abweichung der Diffusstrahlung ist allgemein ein wenig höher, maximal beträgt sie 11.9 %. Auch hier ist eine Ursache die schlechtere Messgenauigkeit der eingesetzten Strahlungsmessgeräte bei tiefen Einstrahlungen. Eine weitere Fehlerquelle ist sicherlich die Schattenringkorrektur, die nur den Sonnenstand, nicht aber die Anisotropie der Diffusstrahlung berücksichtigen kann.

3.2 Bruttowärmeertrag BWE

Für den Vergleich des berechneten zum gemessenen BWE werden folgende Kurzzeichen verwendet :

BWE m	:	Gemessener Bruttowärmeertrag
BWE r	:	Berechneter Bruttowärmeertrag
T _{amb}	:	Aussentemperatur
T _m	:	Mittlere Kollektortemperatur
FK	:	Flachkollektor
VK	:	Vakuumröhrenkollektor

Zusätzlich wird die Abweichung von den gerechneten zu den gemessenen Werten angegeben :

Beispiel :

$$\text{Abweichung [Wh/m}^2\text{]} = \text{BWE r} - \text{BWE m}$$

$$\text{Abweichung [\%]} = (\text{BWE r} / \text{BWE m} - 1) * 100$$

Orientierung [°]	Neigung [°]	Tamb [°C]	Tm [°C]	BWE r [Wh/m2]	BWE m [Wh/m2]	Abweichung [Wh/m2]	Abweichung [%]
0	0	14.8	20.5	487.6	515.5	-27.9	-5.4
0	0	18.9	22.6	1919.1	1911.8	7.3	0.4
0	0	28.2	34.6	3651.4	3561.8	89.6	2.5
0	0	25.9	33.4	3889.4	3778.1	111.3	2.9
0	30	11.3	15.5	542.3	512.8	29.5	5.8
0	30	17.3	20.8	870.7	806.5	64.2	8.0
0	30	14.8	22.7	3162.1	3256.9	-94.8	-2.9
0	30	25.7	42.6	3219.0	3044.8	174.2	5.7
0	45	20.9	30.6	831.9	799	37.4	4.7
0	45	23.5	80.5	1306	1224.8	81.2	6.6
0	45	21.1	41.7	2230.1	2103.6	126.5	6.0
0	45	15.5	32.4	2854.8	2733.8	121.0	4.4
0	45	21.5	62.0	2347	2497.2	-150.2	-6.0
0	45	31.1	43.5	3798.9	3627.3	171.6	4.7
0	60	15.7	22.9	1277.7	1174.1	103.6	8.8
0	60	15.9	27	2432.5	2416.5	16	0.7
0	60	18.2	27.6	3176.9	3130.6	46.3	1.5
0	60	5.8	14.0	4792.9	4727.9	65.0	1.4
0	90	4.5	6.6	1550.4	1503.4	46.7	3.1
0	90	10.8	25.8	2856.7	2941.9	-85.2	-2.9
0	90	18.4	22.8	3334.6	3309.3	25.3	0.8
30	30	13.1	18.5	573.9	536.8	37.1	6.9
30	30	15.4	18.9	1118	1004.2	113.8	11.3
45	60	13.3	31.7	2059.9	1918.1	141.8	7.4
45	60	16.1	32	2262.7	2170.8	91.9	4.2
45	60	21.2	42.1	2938.6	2799.5	139.1	5.0
-30	0	0.9	4.5	420.5	428.1	-7.6	-1.8
-30	0	1.3	4.6	598.0	618.6	-23.6	-3.8
-30	0	15.2	22.4	3038.9	2910.2	128.7	4.4
-30	30	13.2	18.2	177.5	192.2	-14.7	-7.6
-30	30	13.8	18.8	911.5	897.9	13.6	1.5
-30	30	12.6	15.9	1000.3	989.1	11.2	1.1
-30	30	16.3	19.5	1191.7	1281.5	-89.8	-7.0
-30	30	19.5	54.9	1618.1	1642.8	-24.7	-1.5
-30	45	0.3	4.7	713.7	643.8	69.9	10.9
-30	45	1.1	5.3	1321.9	1307.9	14.0	1.1
-30	45	4.3	7.8	2473.3	2454.2	19.1	0.8
-45	30	3.8	5.5	351.5	356.3	-4.8	-1.3
-45	30	3.4	5.6	426.3	418.8	7.5	1.8
-45	30	0.1	4.5	440.8	428.2	12.6	2.9
-45	30	19.8	37.7	3610.3	3858.0	-247.7	-6.4
-45	30	9.5	32.7	3431.1	3379.4	51.7	1.5
-45	45	2.3	5.4	300.7	290.7	10.0	3.4
-45	45	3.4	15.3	1057.4	1002.1	55.3	5.5
-45	45	17.1	31.1	1248.4	1294.4	-46.0	-3.6
-45	45	19	33.1	3853.7	3863.1	-9.4	-0.2
-45	60	17.2	18.7	659.2	590.1	69.1	11.7
-45	60	2.2	4.7	640.2	590.6	49.6	8.4
-45	60	22.9	42	2676.1	2657.3	18.8	0.7
-45	60	21.7	61.6	2211.5	2311.8	-100.3	-4.3

Fig. 11 : BWE für den Flachkollektor

Orientierung [°]	Neigung [°]	Tamb [°C]	Tm [°C]	BWE r [Wh/m ²]	BWE m [Wh/m ²]	Abweichung [Wh/m ²]	Abweichung [%]
0	0	14.8	27.7	536.1	620.6	-84.5	-13.6
0	0	18.9	32.2	1977.6	2335.9	-358.3	-15.3
0	0	28.2	41.2	3730.5	3820.1	-89.6	-2.3
0	0	25.9	40.2	4007.1	4109.2	-102.1	-2.5
0	30	11.3	19.9	586.9	593.4	-6.5	-1.1
0	30	17.3	24.9	891.4	864.4	27.0	3.1
0	30	14.8	31.6	3255.9	3395.4	-139.5	-4.1
0	30	25.7	51.0	3444.4	3329.1	115.3	3.5
0	45	20.9	37.7	939.9	914.3	25.6	2.8
0	45	23.5	88.9	1853.8	1904.2	-50.4	-2.6
0	45	21.1	50.4	2504.6	2392.1	112.5	4.7
0	45	15.5	39.1	3102.2	3050.3	51.9	1.7
0	45	21.5	70.6	2942.4	3116.3	-173.9	-5.6
0	45	31.1	51.9	3958.8	3823.4	135.4	3.5
0	60	15.7	27.4	1359.6	1232.0	127.6	10.4
0	60	15.9	35.9	2563.8	2500.0	63.8	2.6
0	60	18.2	35.9	3289.8	3229.1	60.7	1.9
0	60	5.8	22.7	4932.2	4904.4	27.8	0.6
0	90	4.5	12.3	1537.7	1431.4	106.3	7.4
0	90	10.8	35.2	3071.6	3180.0	-108.4	-3.4
0	90	18.4	31.7	3407.8	3385.9	21.9	0.6
30	30	13.1	21.9	651.1	665.3	-14.2	-2.1
30	30	15.4	22.2	1161.4	1148.1	13.3	1.2
45	60	13.3	41.0	2334.4	2336.2	-1.8	-0.1
45	60	16.1	41.2	2447.8	2472.7	-24.9	-1.0
45	60	21.2	51.1	3226.0	3184.0	42.0	1.3
-30	0	0.9	10.0	447.3	474.8	-28.5	-5.8
-30	0	1.3	10.0	629.2	674.2	-45	-6.7
-30	0	15.2	31.5	3135.3	3287.0	-151.7	-4.6
-30	30	13.2	25.5	209.5	247.2	-37.7	-15.3
-30	30	13.8	26.1	940.9	1017.2	-76.3	-7.5
-30	30	12.6	18.5	1042.6	1068.6	-26.0	-2.4
-30	30	16.3	26.6	1179.6	1326.3	-146.7	-11.1
-30	30	19.5	62.5	2137.2	2221.0	-83.8	-3.8
-30	45	0.3	10.0	717.5	638.9	78.6	12.3
-30	45	1.1	10.6	1339.4	1445.6	-106.2	-7.3
-30	45	4.3	17.7	2451.4	2550.5	-99.1	-3.9
-45	30	3.8	10.9	347.5	321.0	26.5	8.3
-45	30	3.4	11.0	430.3	415.7	14.6	3.5
-45	30	0.1	9.8	477.8	483.3	-5.5	-1.1
-45	30	19.8	45.0	3796.9	4183.1	-386.2	-9.2
-45	30	9.5	41.7	3791.4	3819.4	-28.0	-0.7
-45	45	2.3	10.7	322.6	277.2	45.4	16.4
-45	45	3.4	21.3	1223.7	1208.1	15.6	1.3
-45	45	17.1	40.3	1394.4	1367.9	26.5	1.9
-45	45	19	39.1	4012.0	4088.1	-76.1	-1.9
-45	60	17.2	21.9	647.5	570.5	77.0	13.5
-45	60	2.2	6.2	663.9	604.7	59.2	9.8
-45	60	22.9	50.9	2926.6	2796.3	130.3	4.7
-45	60	21.7	70.1	2744.7	2701.2	43.5	1.6

Fig. 12 : BWE für den Vakuumröhrenkollektor

• **Graphische Darstellung der Messergebnisse**

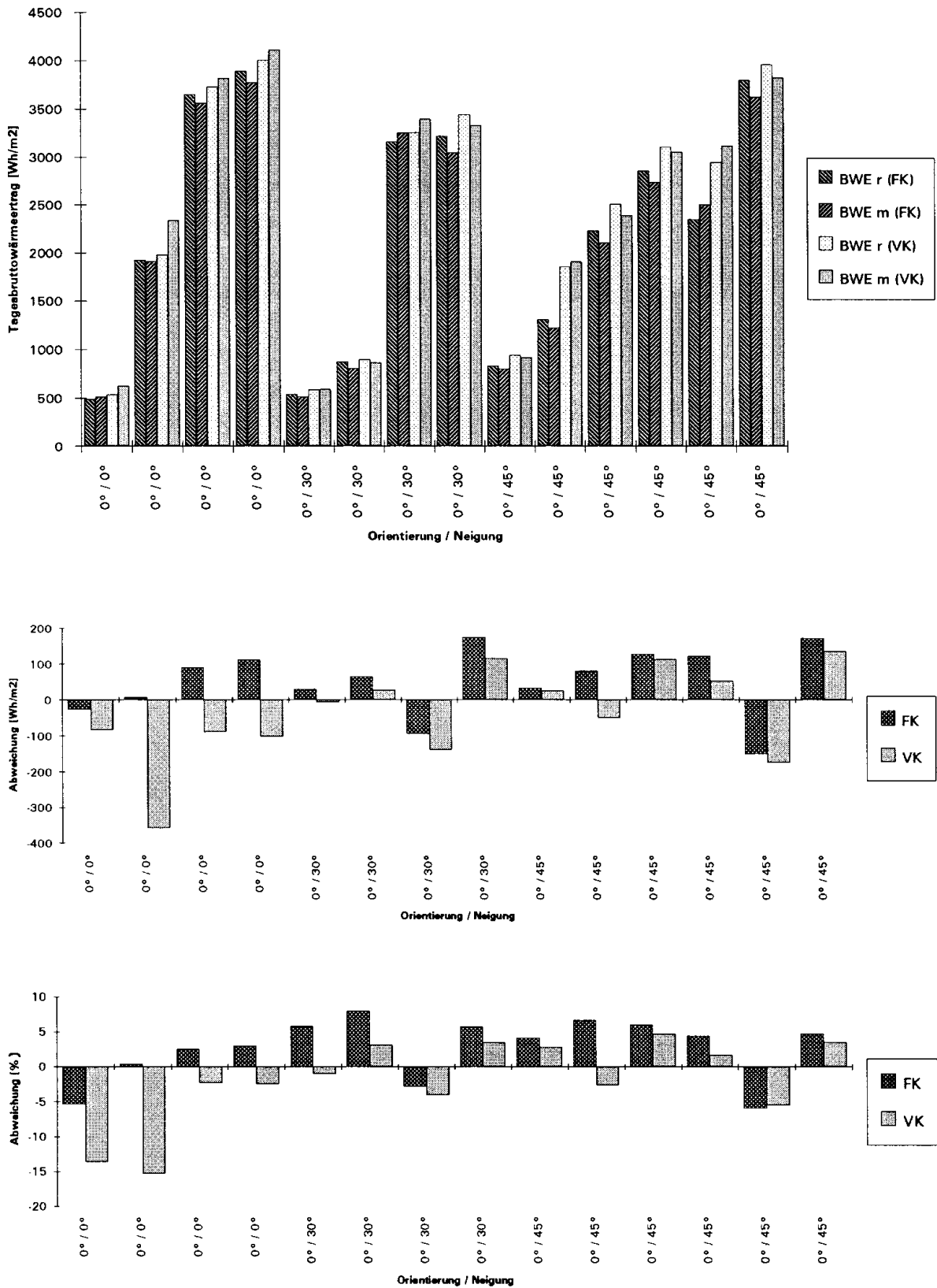


Fig. 13 : Gemessene und berechnete Tagessummen

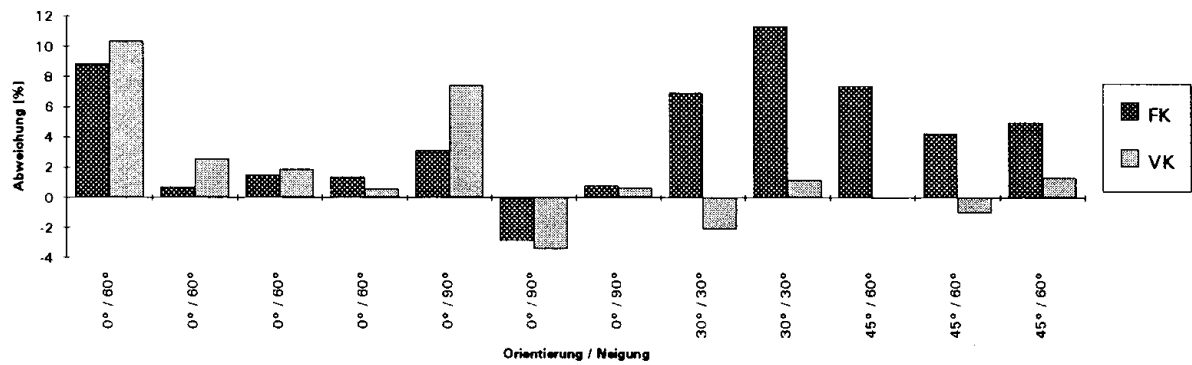
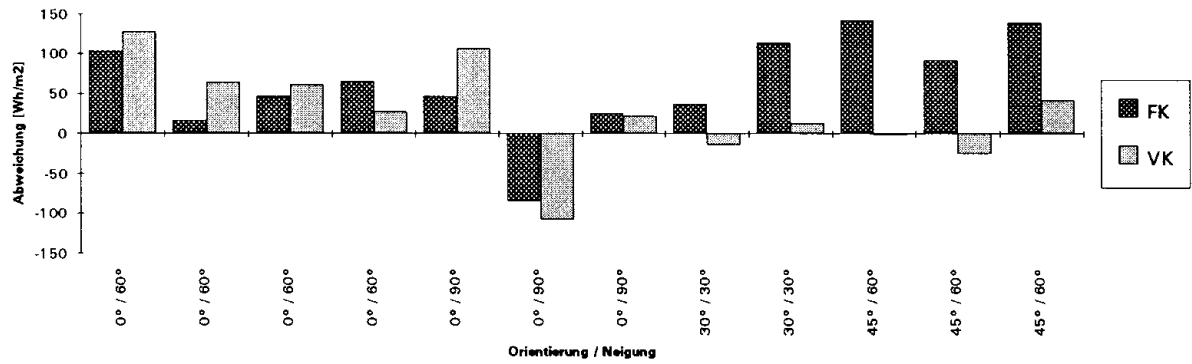
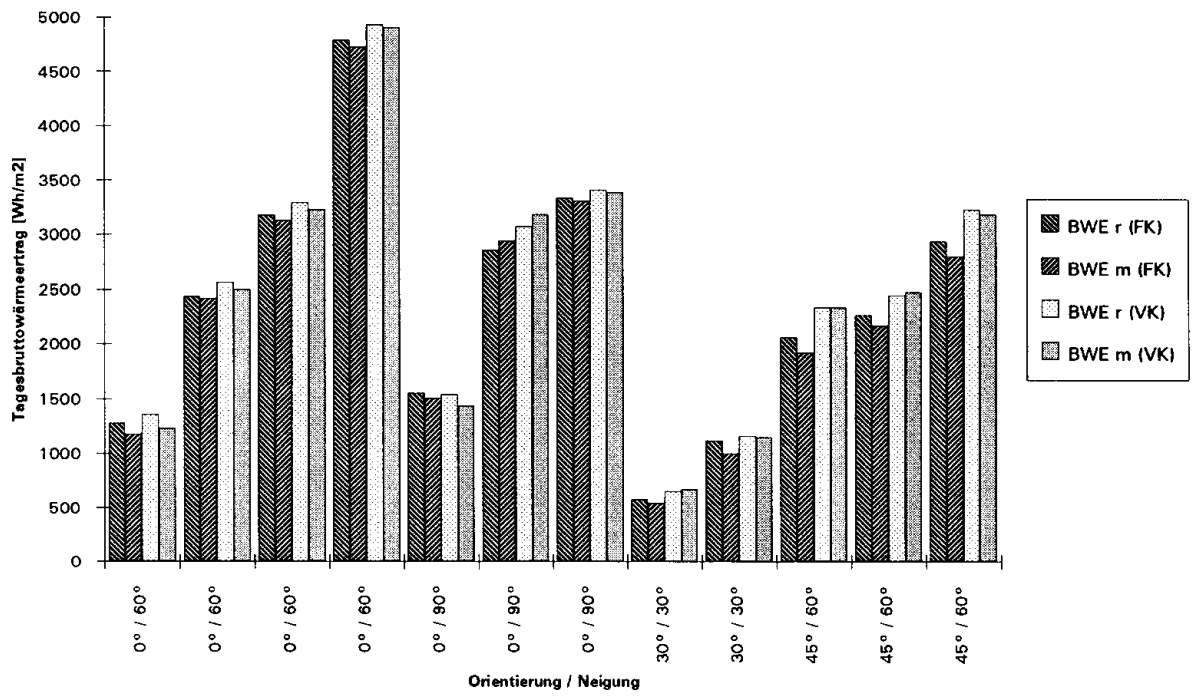


Fig. 14 : Gemessene und berechnete Tagessummen

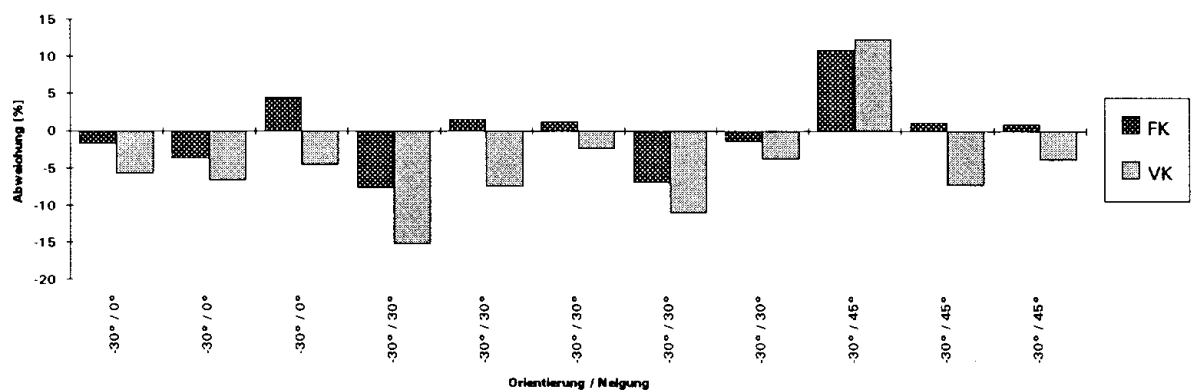
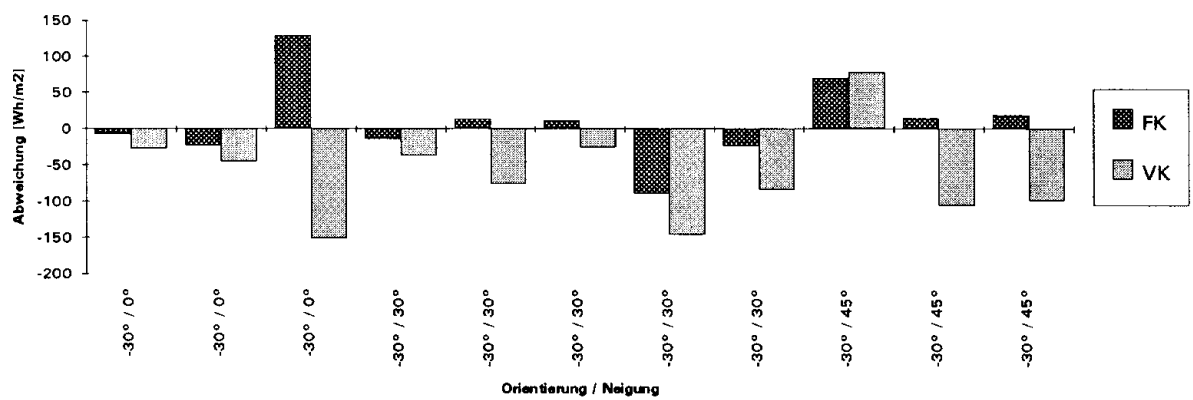
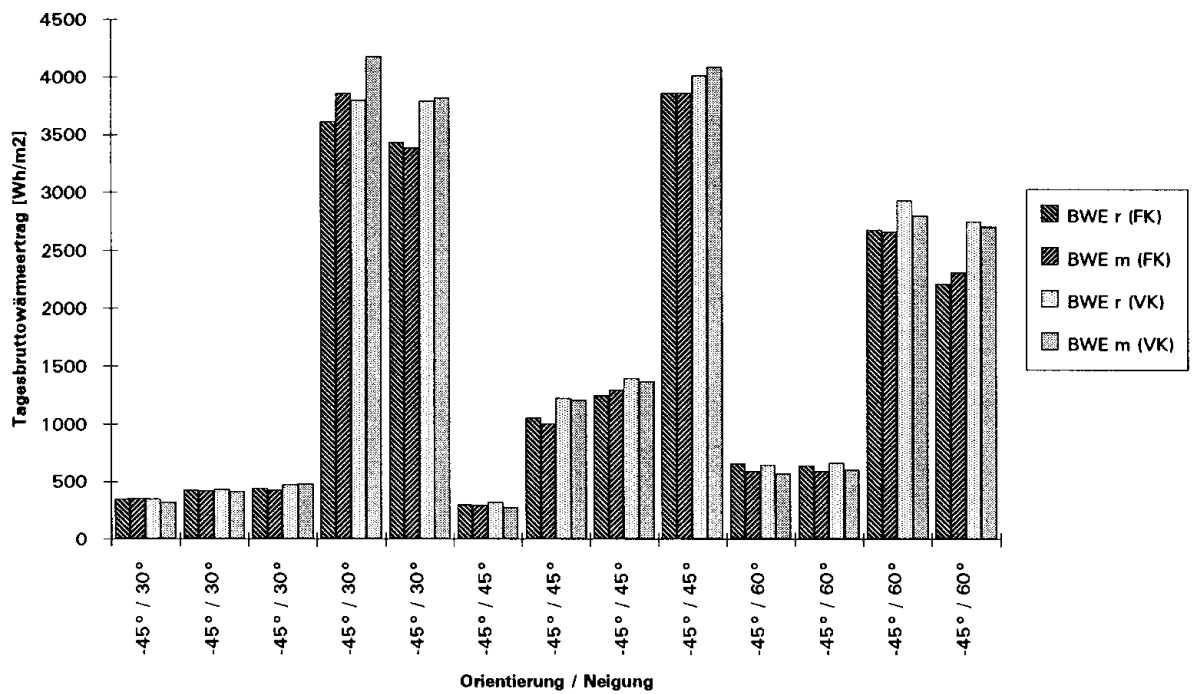


Fig. 15 : Gemessene und berechnete Tagessummen

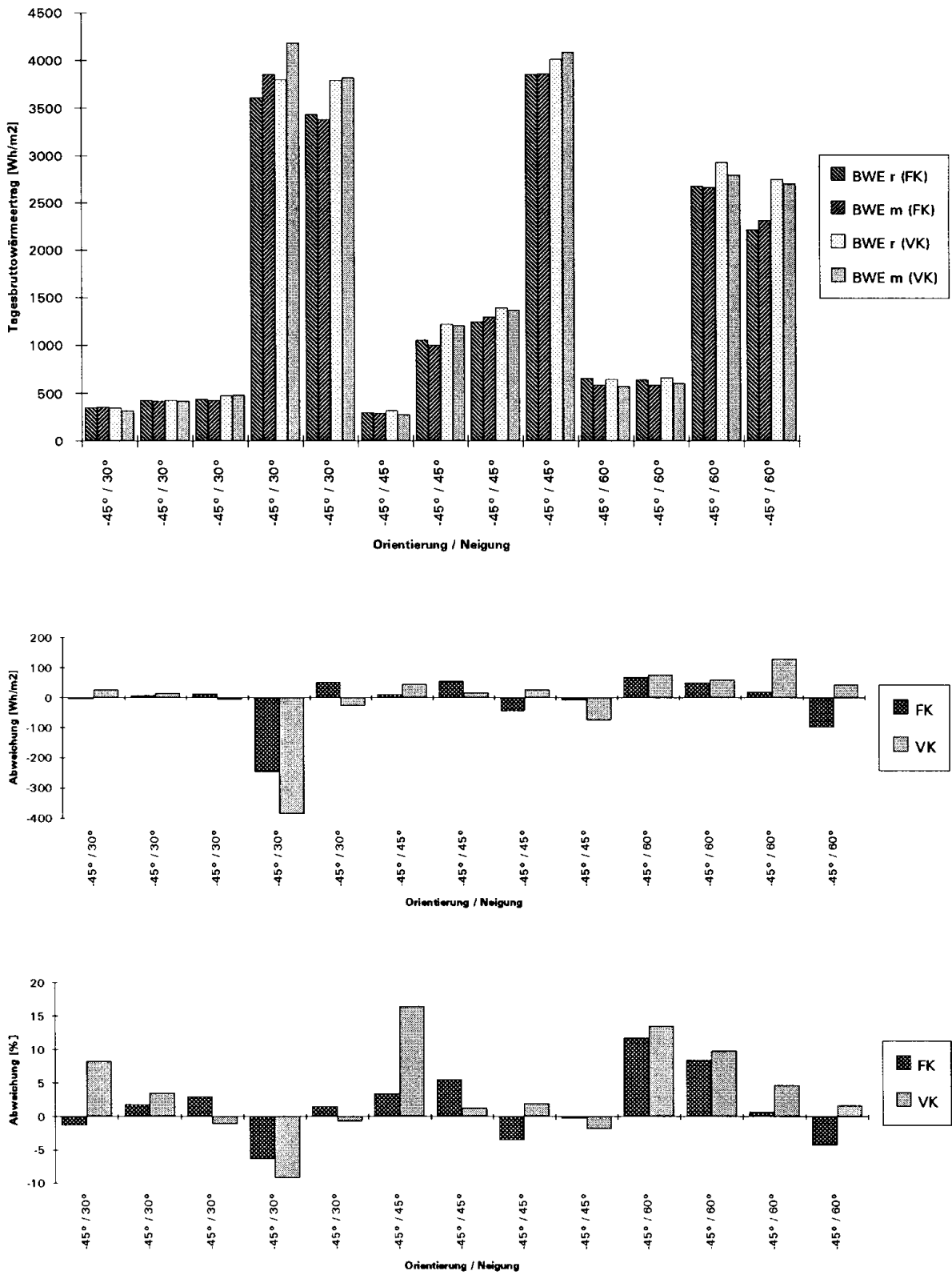


Fig. 16: Gemessene und berechnete Tagessummen

• **Abweichungen von der Strahlungsumrechnung und dem BWE im Vergleich**

Um die Fehlerentwicklung in der Berechnung der einzelnen Schritte aufzuzeigen, sind in den acht folgenden Diagrammen jeweils die absoluten und relativen Abweichungen der Strahlungsumrechnung IGK und IDK (Globalstrahlung bzw. Diffusstrahlung in die Kollektorebene), sowie die relativen Abweichungen der Bruttowärmeertragsberechnung FK und VK (Flach-bzw. Vakuumröhrenkollektor) vergleichend angegeben.

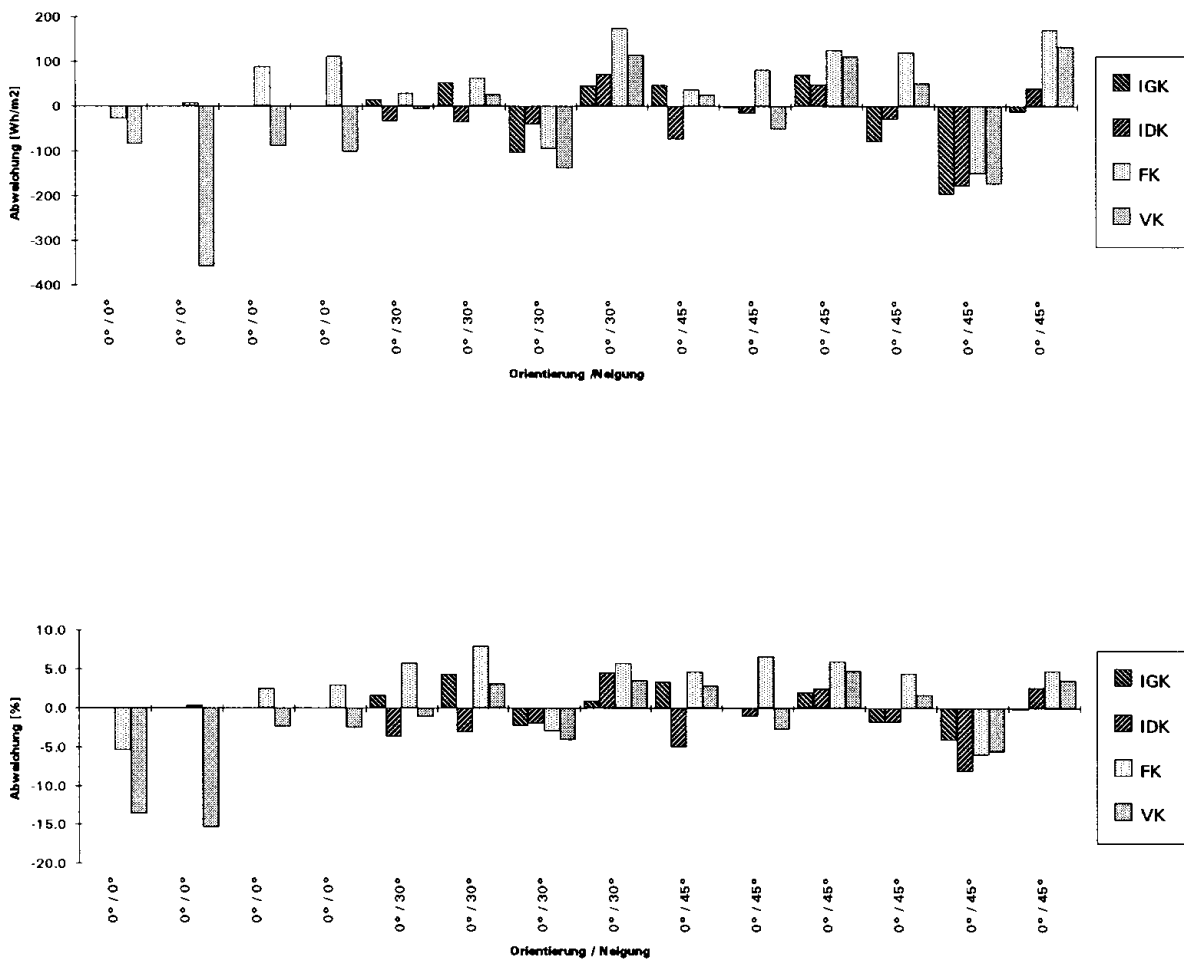


Fig. 17 : Absolute und relative Abweichungen im Vergleich

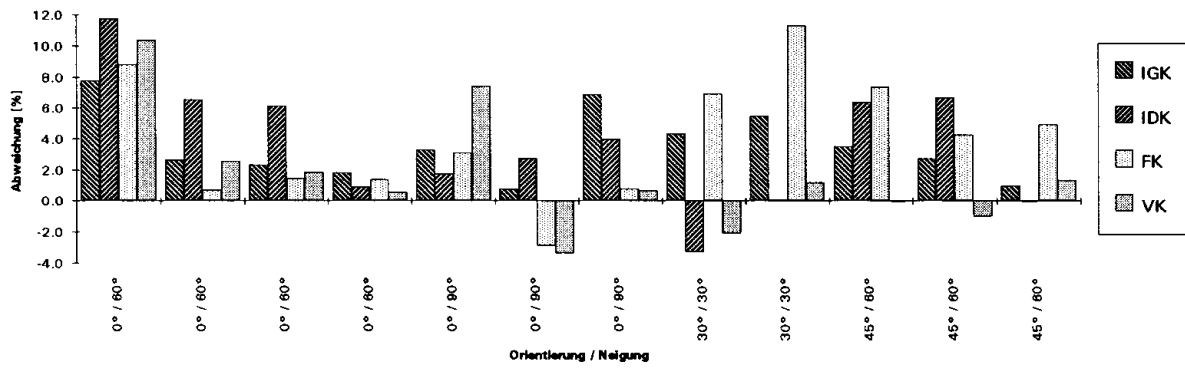
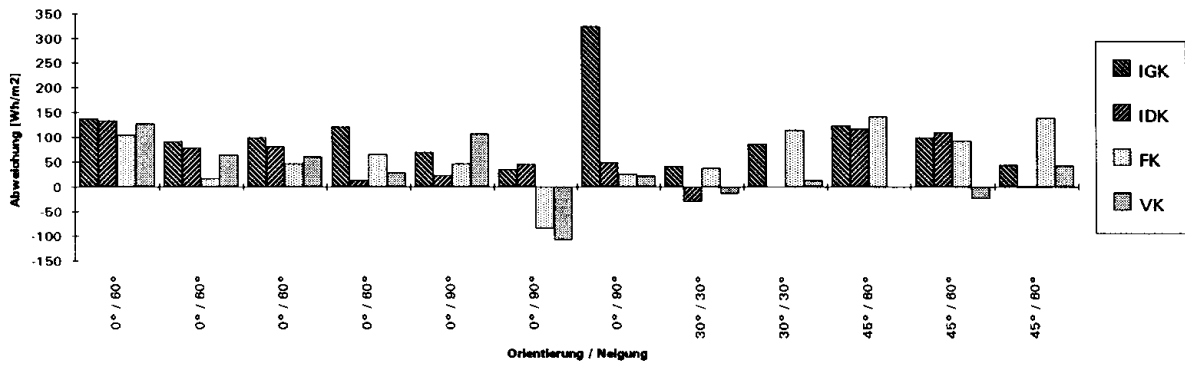


Fig. 18 : Absolute und relative Abweichungen im Vergleich

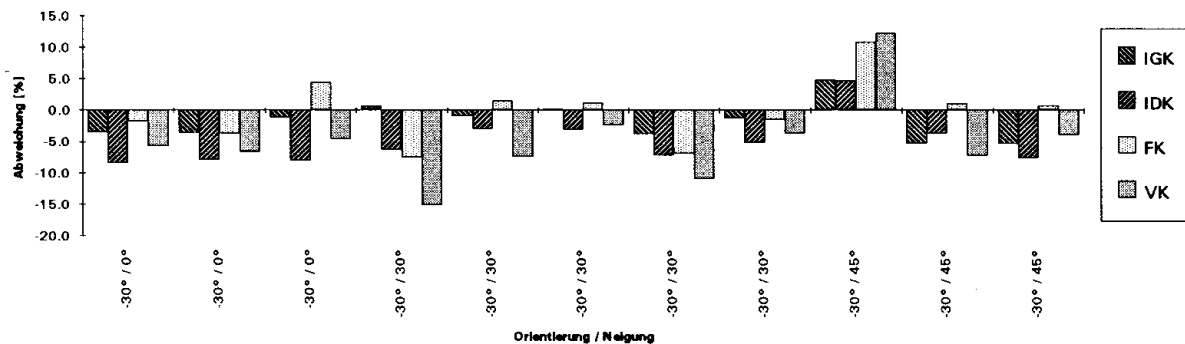
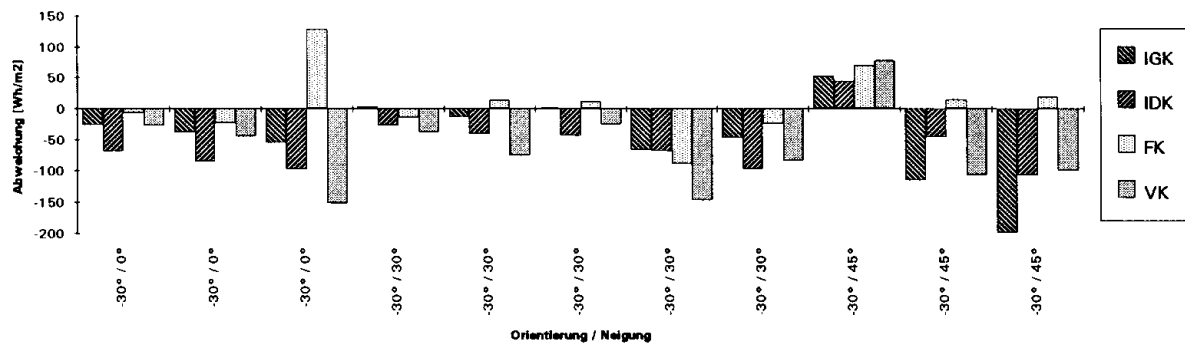


Fig. 19 : Absolute und relative Abweichungen im Vergleich

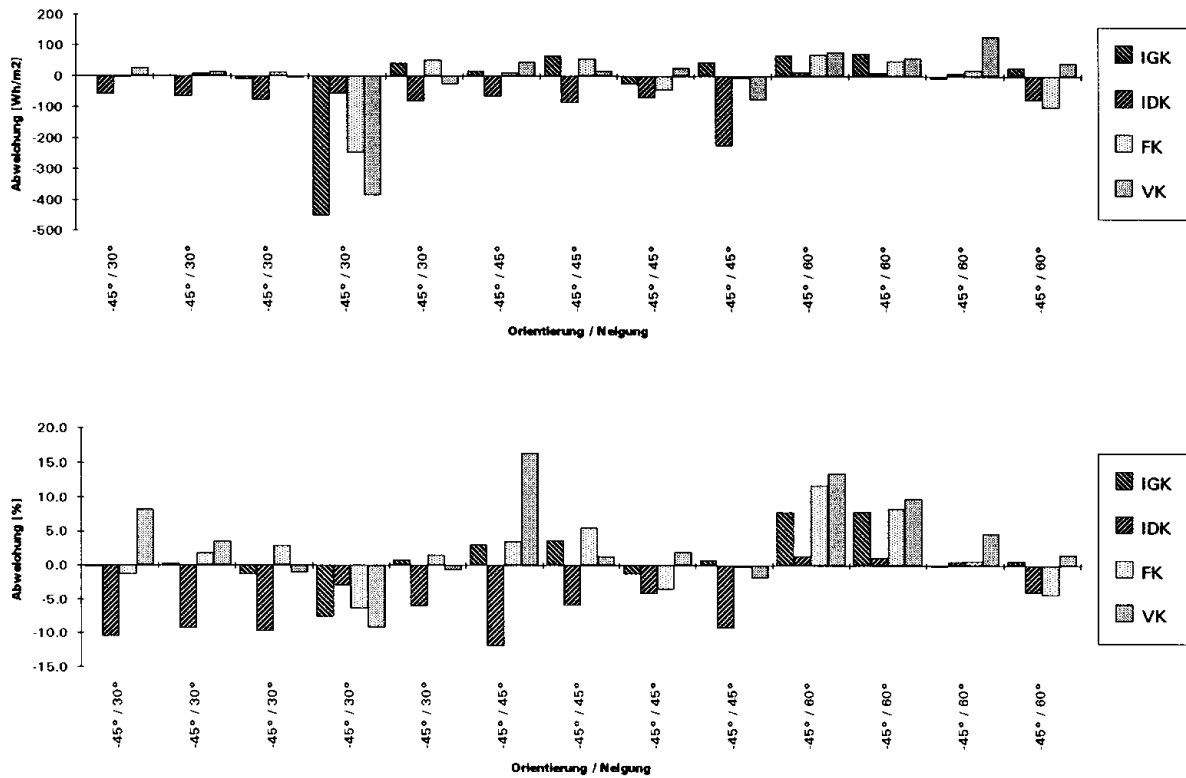


Fig. 20 : Absolute und relative Abweichungen im Vergleich

• **Diskussion der Resultate**

Beim Flachkollektor beträgt die maximale Differenz zwischen gemessenem und gerechnetem Bruttowärmeertrag 11.7 %. In diesem Fall weist jedoch schon die Umrechnung der Globalstrahlung den maximalen Fehler von 7.9 % auf.

Es lässt sich die Tendenz feststellen, dass die berechneten Erträge über den gemessenen Werten liegen, dass also das Modell den Flachkollektor eher zu gut bewertet (in 36 von 50 Fällen).

Der maximale Fehler beim Vakuumröhrenkollektor liegt bei 16.4 %. Jedoch beträgt hier der gemessene Tagesertrag nur 277.2 Wh/m² und die absolute Abweichung 45.4 Wh/m².

Auffallend ist, dass am häufigsten dort hohe Abweichungen auftreten, wo Messungen mit hohen Diffusanteilen gemacht wurden. Dies lässt darauf schließen, dass der Diffuswirkungswirkungsgrad des Kollektors im Modell ungenügend beurteilt wird. Im nächsten Kapitel wird dieser Punkt genauer untersucht.

3.3 BWE für den Vakuumröhrenkollektor (Vergleich der BWE's mit zwei unterschiedlich eingesetzten Diffuswirkungsgraden)

Auf Grund von Erfahrungswerten wird im "BWE91"-Modell der Quotient p zwischen $c_{0\text{diff}}$ (c_0 gemessen bei diffuser Strahlung) und $c_{0\text{dir}}$ (c_0 gemessen bei direkter Einstrahlung) für Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren mit $p = 0.89$ in die Berechnung einbezogen.

Die obengenannte Annahme wurde bei beiden Testkollektoren überprüft. Daraus wurde klar ersichtlich, dass im Falle des Röhrenkollektors der Diffuswirkungsgrad deutlich höher liegt, nämlich 96 % anstelle 89 % des Direktstrahlungswirkungsgrades. Für den Flachkollektor wurde der Wert von $p = 0.89$ bestätigt.

Somit wurden die Bruttowärmeerträge für den Vakuumröhrenkollektor nochmals mit dem neu bestimmten Diffuswirkungsgrad berechnet. In den folgenden vier Diagrammen wird jeweils die relative Abweichung der Rechnung mit $p=0.89$ bzw. $p=0.96$ zur Messung angegeben.

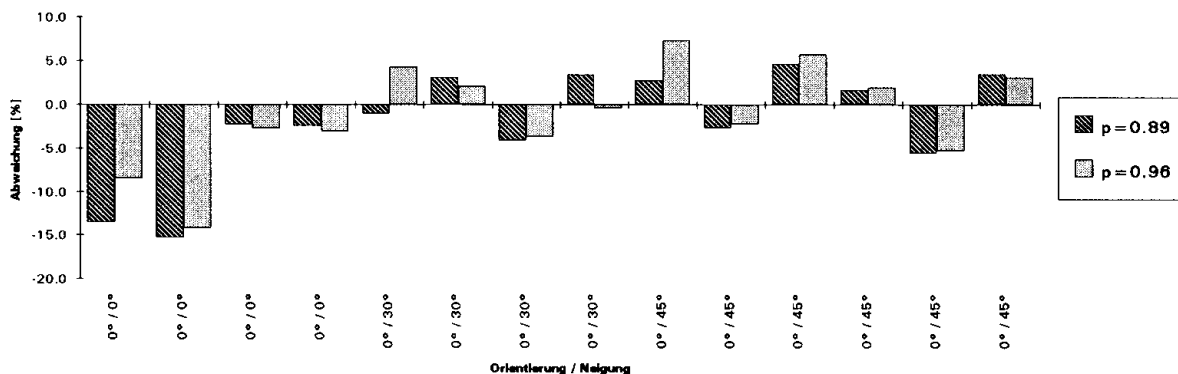


Fig. 21 : Relative Abweichungen der Bruttowärmeerträge

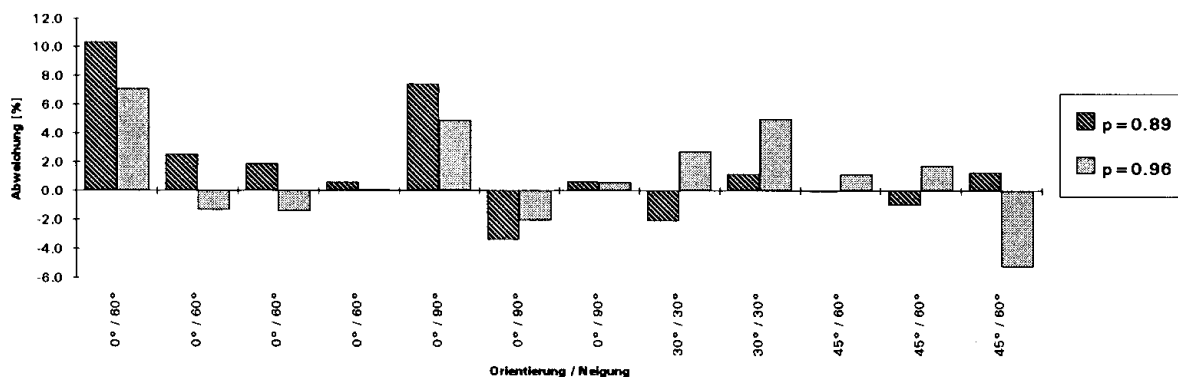


Fig. 22 : Relative Abweichungen der Bruttowärmeerträge

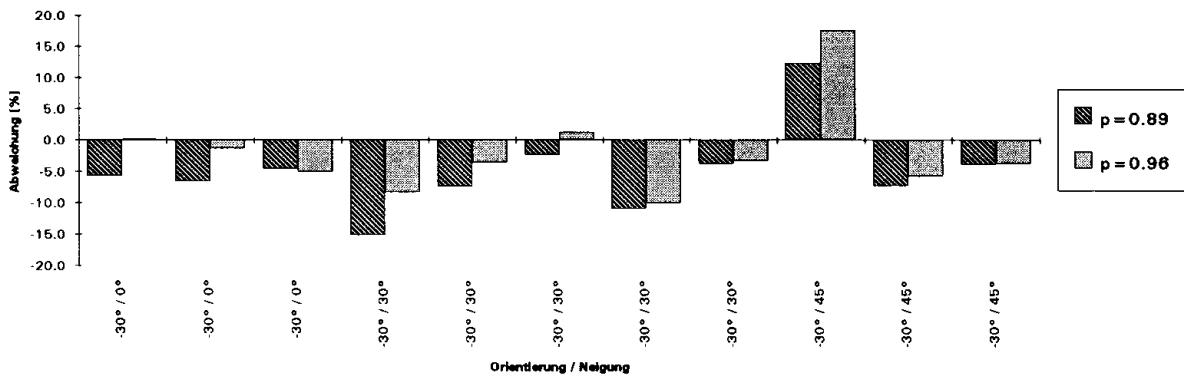


Fig. 23 : Relative Abweichungen der Bruttowärmeerträge

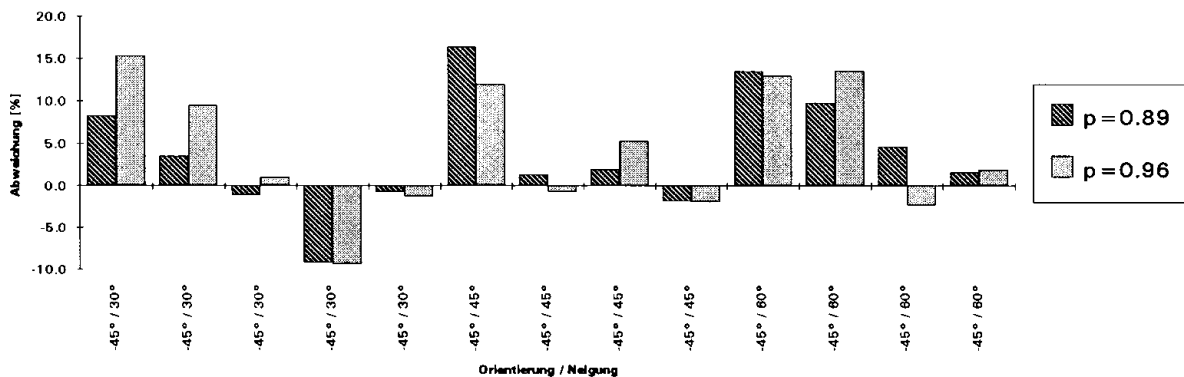


Fig. 24 : Relative Abweichungen der Bruttowärmeerträge

• **Diskussion der Resultate**

Aus den Resultaten ist kein klarer Trend ersichtlich. In 29 von 50 Fällen verringert sich die Abweichung zu den Messwerten. Jedoch ist der Effekt minimal. Die erwünschte und massive Annäherung der Rechen- an die Messwerte konnte durch diese Massnahme nicht erreicht werden.

Trotzdem wird in Zukunft bei speziellen Kollektorkonstruktionen der Diffuswirkungsgrad gemessen und im "BWE 91"- Modell entsprechend eingesetzt.

3.4 Auswirkungen von Stundenmittelwert-Meteodaten auf die Validierungsergebnisse

Alle thermischen Kollektoren besitzen eine Wärmekapazität, die im Betrieb einer Solaranlage deutlich spürbar ist. So wird zum Beispiel die Austrittstemperatur des Kollektors bei stark schwankenden Strahlungsbedingungen geglättet (siehe Fig. 25). Zusätzlich treten Aufheiz- bzw. Abkühlverluste auf.

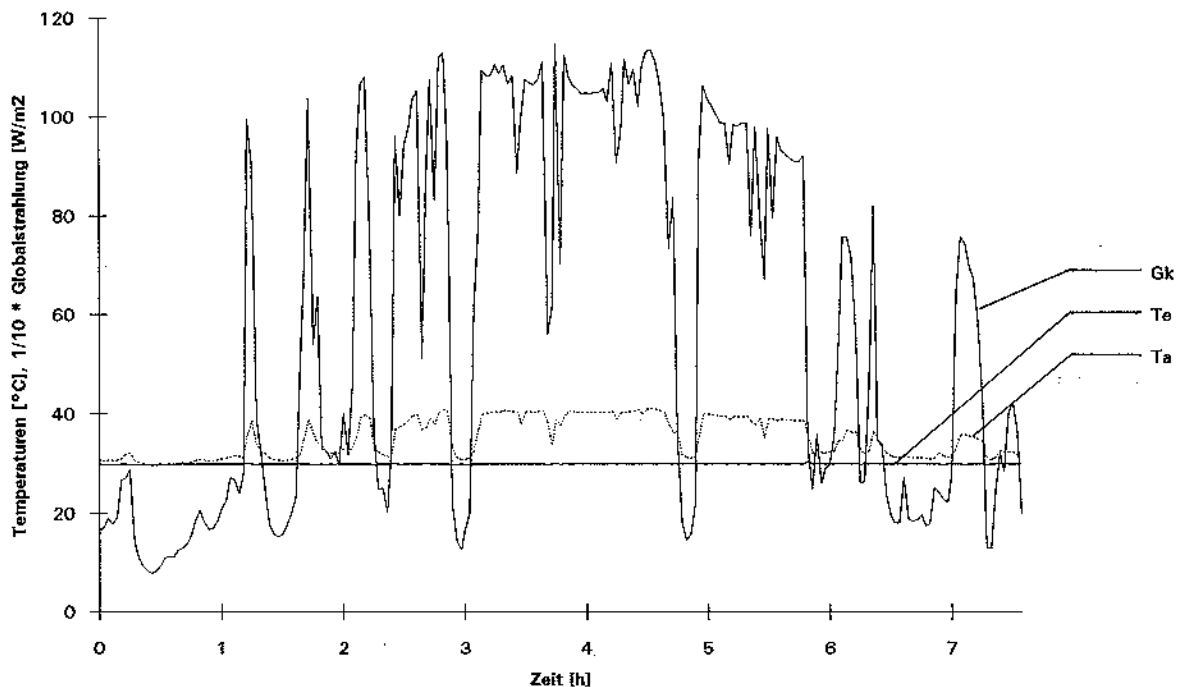


Fig. 25 : Tagesverlauf von Globalstrahlung (Gk), Ein- und Austrittstemperatur (Te und Ta) des Flachkollektors

Stundenwert-Meteodaten als Inputdaten des Modells sollten, vorallem bei stark schwankender Einstrahlung, dem obenerwähnten Kollektorverhalten entgegen kommen, da durch die Mittelwertbildung z.B. der Strahlungsverlauf ebenfalls geglättet wird.

Um dies zu verifizieren, wurden die Vergleiche bei drei schönen, drei wechselhaften und drei schlechten Tagen gemacht.

Für die Darstellung der Resultate werden z.B. folgende Kurzzeichen verwendet :

BWE m	:	Gemessener Bruttowärmeertrag
BWE r(2-Min.)	:	Berechneter Bruttowärmeertrag basierend auf 2-Minuten-Mittelwerten
BWE r (1-Std.)	:	Berechneter Bruttowärmeertrag basierend auf Stundenmittelwerten

• Messresultate

Orientierung [°]	Neigung [°]	IGK m [Wh/m ²]	IGK r (2-Min.) [Wh/m ²]	IGK r (Std.) [Wh/m ²]	Abweichung (2-Min.) / [%]	Abweichung (Std.) / [%]
0	0	4944.9	4944.9	4870.7	0	-1.5
0	45	5318.5	5306.7	5283.3	-0.2	-0.7
0	45	4810.1	4613.4	4203.6	-4.1	-12.6
0	45	3539.3	3609.4	3371.9	2.0	-4.7
0	45	4405.8	4326.8	4129.2	-1.8	-6.3
0	45	3536.3	3533.3	3314.6	-0.1	-6.3
0	45	1437.5	1485.6	1252.6	3.4	-12.9
-30	30	429.6	432.4	404.6	0.7	-5.8
-30	30	1443.5	1430.0	1295.9	-0.9	-10.2

Messungen 1-3 : Schönwettertage

Messungen 4-6 : Tage mit wechselnder Einstrahlung

Messungen 7-9 : Schlechtwettertage

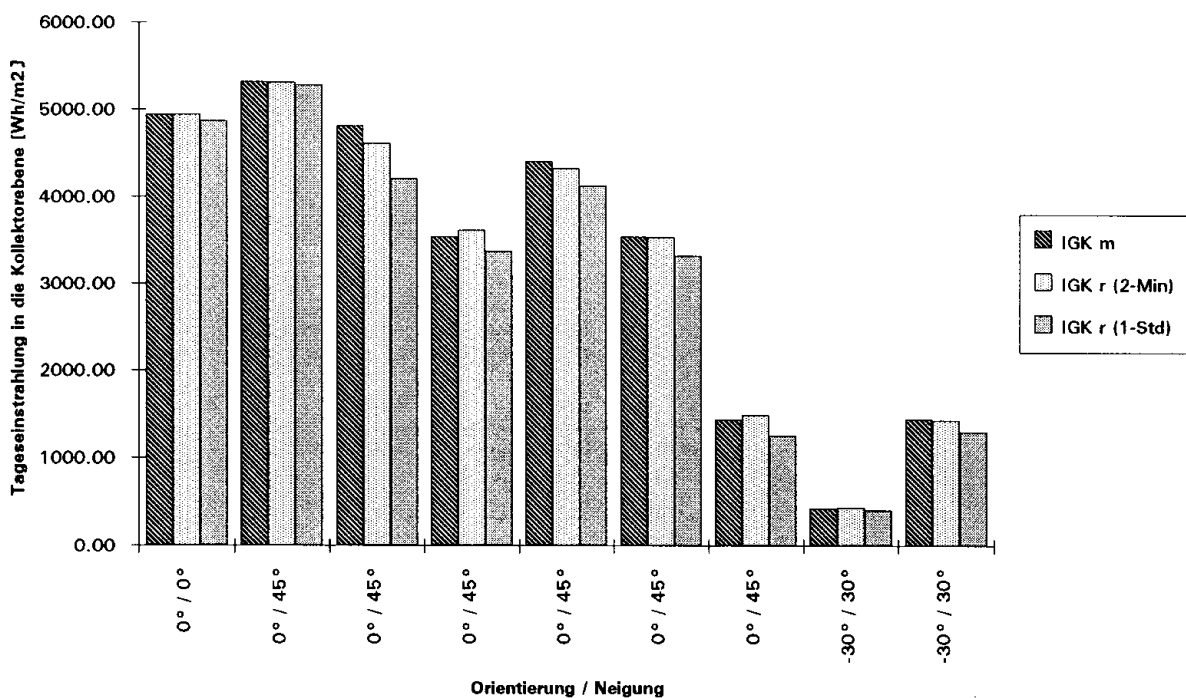


Fig. 26 : Vergleich der gemessenen zu der berechneten Globalstrahlung in die Kollektorebene

Orientierung [°]	Neigung [°]	IDK m [Wh/m2]	IDK r (2-Min.) [Wh/m2]	IDK r (Std.) [Wh/m2]	Abweichung (2-Min.) / [%]	Abweichung (Std.) / [%]
0	0	1604.7	1604.7	1550.1	0	-3.4
0	45	1572.3	1613.1	1530.4	2.6	-2.7
0	45	2190.1	2012.5	1823.8	-8.1	-16.3
0	45	1966.0	2015.0	1952.3	2.5	-0.7
0	45	1697.3	1668.0	1535.2	-1.7	-10.0
0	45	1581.3	1565.4	1480.8	-1.0	-6.4
0	45	1468.9	1395.9	1202.1	-5.0	-18.2
-30	30	432.3	404.60	380.3	-6.4	-12.0
-30	30	1345.6	1304.5	1110.2	-3.1	-17.5

Messungen 1-3 : Schönwettertage

Messungen 4-6 : Tage mit wechselnder Einstrahlung

Messungen 7-9 : Schlechtwettertage

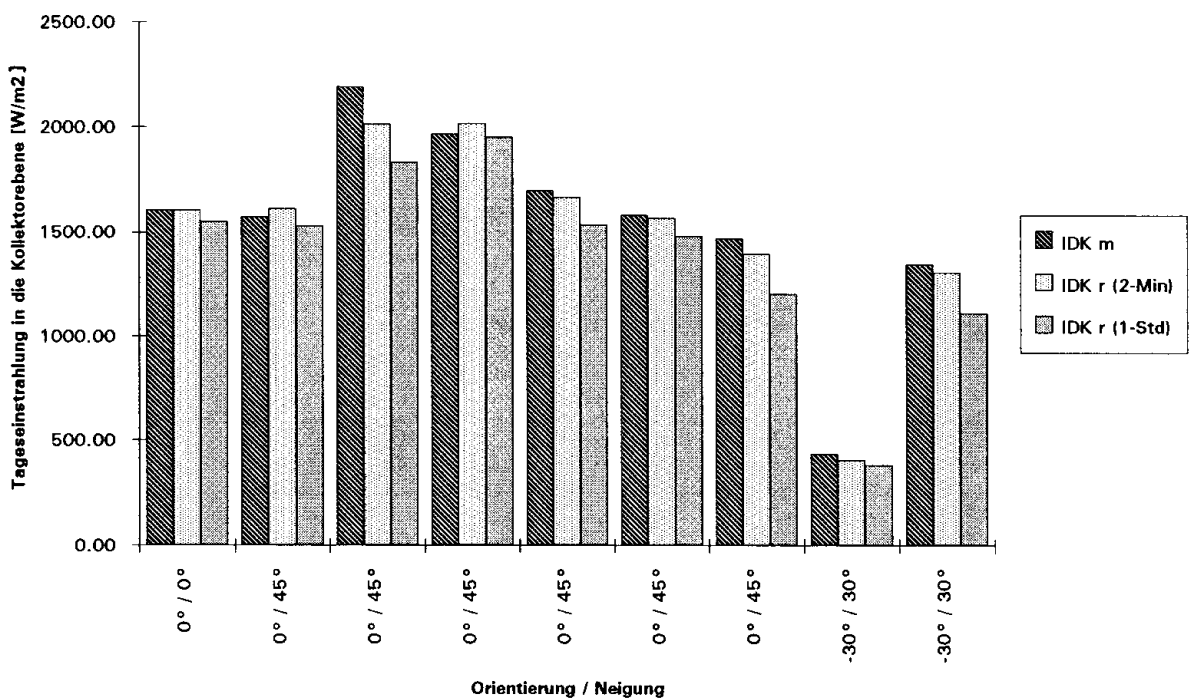


Fig. 27 : Vergleich der gemessenen zu der berechneten Diffusstrahlung in die Kollektorebene

Orientierung [°]	Neigung [°]	BWE m [Wh/m ²]	BWE r (2-Min.) [Wh/m ²]	BWE r (Std.) [Wh/m ²]	Abweichung (2-Min.) / [%]	Abweichung (Std.) / [%]
0	0	3561.8	3651.4	3797.9	2.5	6.6
0	45	3627.3	3798.9	3843.8	4.7	6.0
0	45	2497.2	2347.0	2231.1	-6.0	-10.7
0	45	2103.6	2230.1	2097.3	6.0	-0.3
0	45	2733.8	2854.8	2811.1	4.4	2.8
0	45	1224.8	1306.0	1193.1	6.6	-2.6
0	45	799.0	836.4	703.7	4.7	-11.9
-30	30	192.2	177.5	176.6	-7.7	-8.1
-30	30	897.9	911.5	831.4	1.5	-7.4

Messungen 1-3 : Schönwettertage

Messungen 4-6 : Tage mit wechselnder Einstrahlung

Messungen 7-9 : Schlechtwettertage

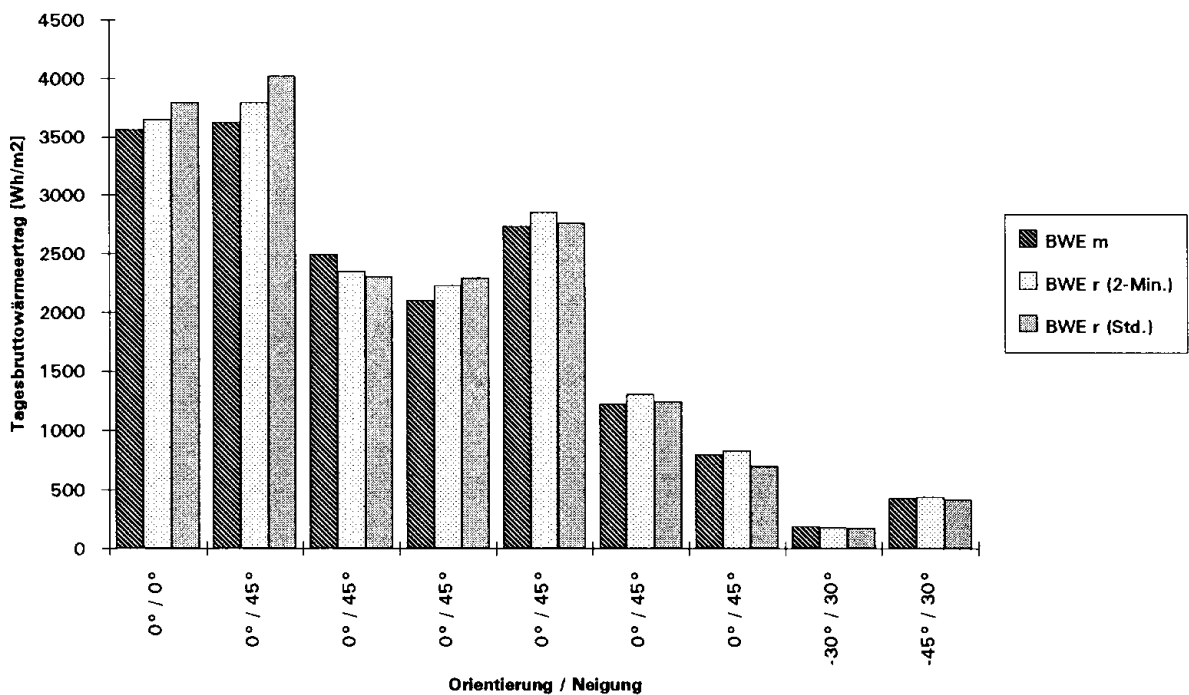


Fig. 28 : Vergleich der gemessenen und berechneten Bruttowärmeerträgen für den Flachkollektor

Orientierung [°]	Neigung [°]	BWE m [Wh/m ²]	BWE r (2-Min.) [Wh/m ²]	BWE r (Std.) [Wh/m ²]	Abweichung (2-Min.) / [%]	Abweichung (Std.) / [%]
0	0	3820.1	3715.5	3943.2	2.5	3.2
0	45	3823.4	3942.6	3975.5	3.1	4.0
0	45	3116.3	2951.3	2761.8	-5.3	-11.4
0	45	2392.1	2530.6	2369.4	5.8	-1.0
0	45	3050.3	3109.9	3038.6	2.0	-0.4
0	45	1904.2	1861.6	1783.6	-2.2	-6.3
0	45	914.3	981.5	835.6	7.4	-8.6
-30	30	247.2	226.4	221.4	-8.4	-10.4
-30	30	1017.2	980.2	889.3	-3.6	-12.6

Messungen 1-3 : Schönwettertage

Messungen 4-6 : Tage mit wechselnder Einstrahlung

Messungen 7-9 : Schlechtwettertage

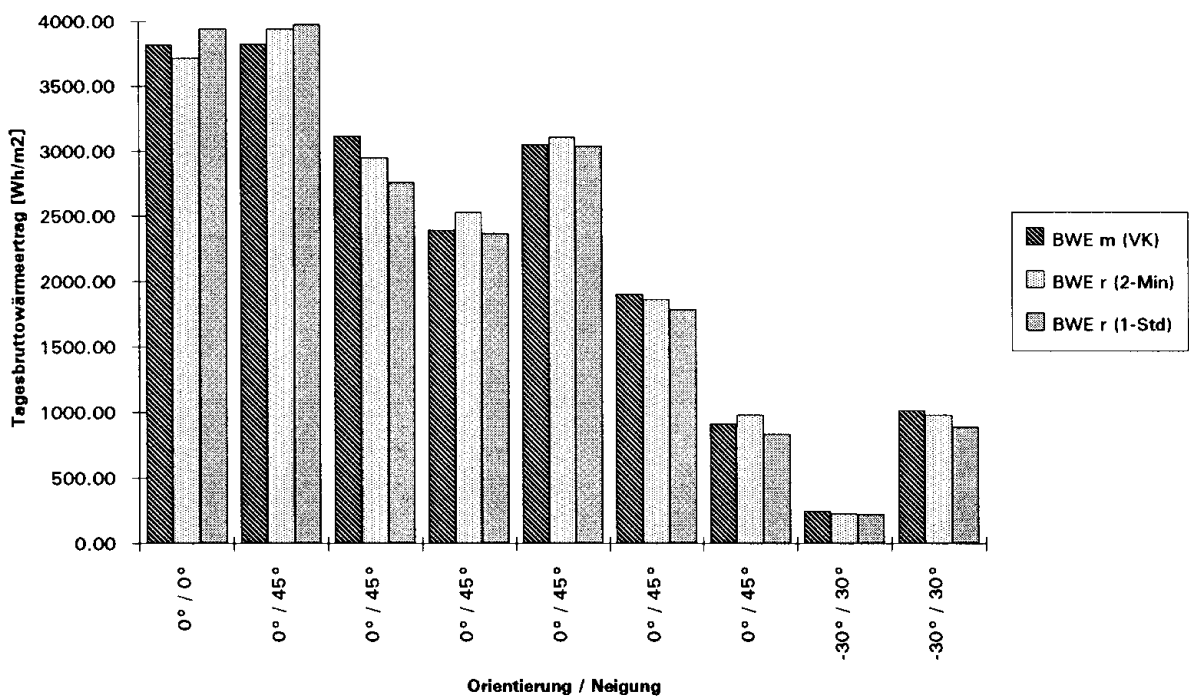


Fig. 29: Vergleich der gemessenen und berechneten Bruttowärmeerträgen für den Vakuumröhrenkollektor ($p = 0.96$)

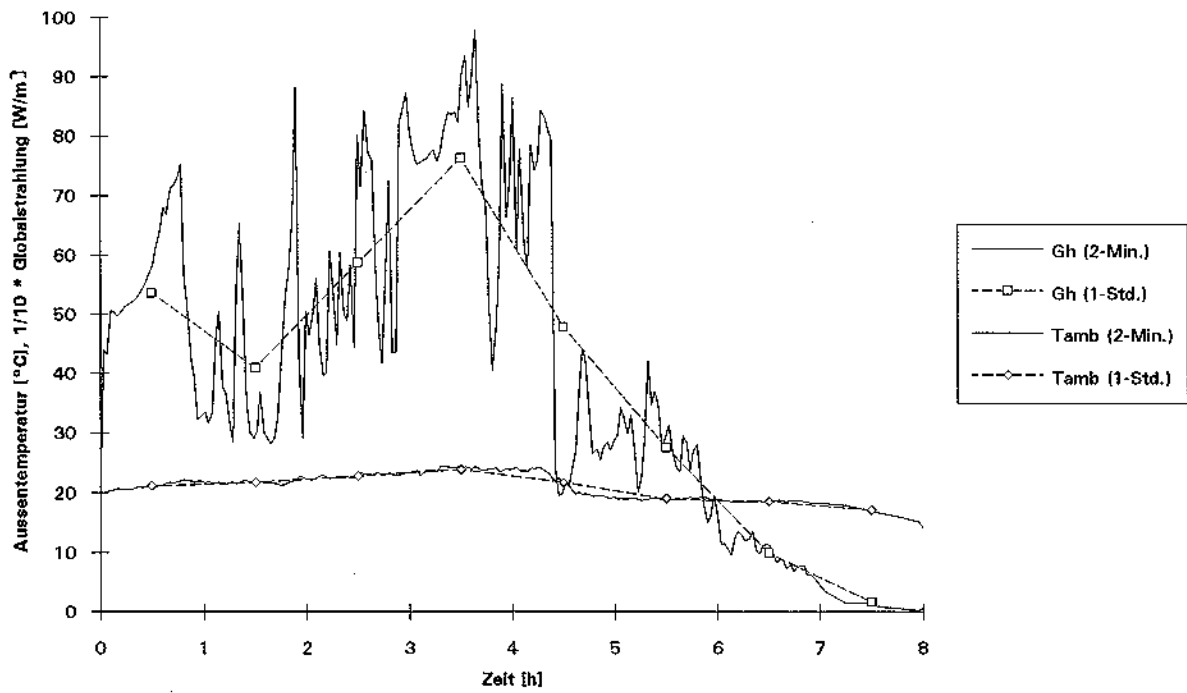


Fig. 31 : Tagesverlauf bei wechselnden Strahlungsbedingungen (4. Messung)

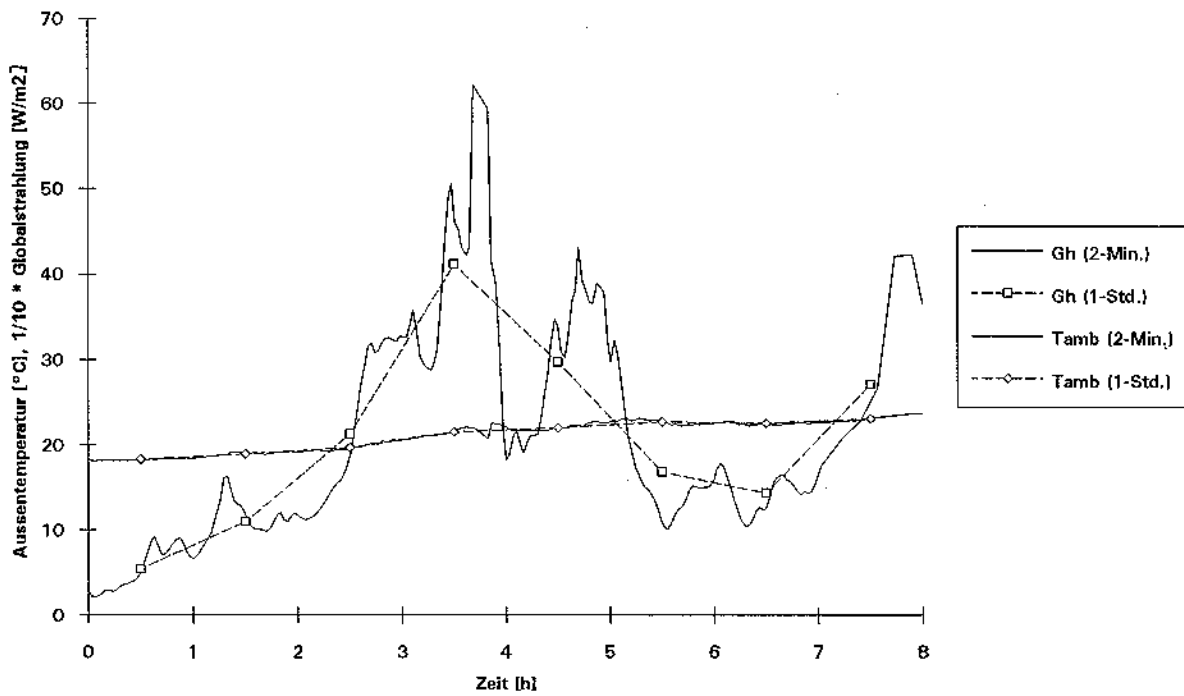


Fig. 32 : Tagesverlauf Schlechtwettertag (7. Messung)

4. Schlussbemerkungen

Das "BWE 91"-Modell wurde bei allen Orientierungen und Neigungen und bei verschiedenen Kollektormitteltemperaturen überprüft. Da sich die Validierung über ein ganzes Jahr erstreckte, konnten auch die meisten klimatischen und meteorologischen Einflüsse berücksichtigt werden.

Die Genauigkeit des Modells für den Einsatz zur Monats- bzw. Jahresertragsberechnung ist ausreichend.

Die grössten Abweichungen bei der Ertragsvorhersage entstehen durch die Unkenntnis der lokalen Strahlungsverhältnisse (z.B. Horizontverlauf, etc.), sowie der jährlichen Schwankungen der Meteorodaten.

Die während der Validierung gesammelten Erfahrungen werden weiter verfolgt und an einer Verbesserung des Modells wird auch künftig gearbeitet.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ P.Ambrosetti und J.Keller , "Das neue Bruttowärmeertragsmodell für verglaste Sonnenkollektoren ", EIR, 2. überarbeitete Auflage , 1985
- /2/ R.Perez , P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, " Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance", Solar Energy Vol.44, No. 5, pp. 271-289, 1990
- /3/ P.Ineichen, "Quatre années de mesures d'ensolleillement à Genève 1978-1982", Thèse No.2089, Université de Genève, Section de Physique, 1983