

Untersuchungen zu kostengünstigeren Alternativen der Direktstrahlungsmessung anstelle eines Pyrheliometers und zweiachsiger Nachführvorrichtung

Marco Larcher, Matthias Rommel
Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR
Oberseestraße 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0) 55 222 41 63, Fax: +41 (0) 55 222 48 44
E-Mail: marco.larcher@solarenergy.ch
Internet: www.solarenergy.ch

Einleitung

In der Wärmeversorgung von industriellen Prozessen wird ein grosses Potential für die thermische Nutzung der Solarenergie mit Kollektoren gesehen. Im Bereich von Betriebstemperaturen über etwa 120°C werden dafür konzentrierende Kollektoren wie Parabolrinnenkollektoren und lineare Fresnelkollektoren eingesetzt. Diese müssen der Sonne nachgeführt werden und können im Wesentlichen nur die Direktstrahlung in Wärme umwandeln. Für die technische Bewertung von konzentrierenden Kollektoren muss deshalb die Direktstrahlung gemessen werden. Dies ist insbesondere wichtig für Monitoring-Projekte, bei denen die thermische Leistungsfähigkeit von konzentrierenden Prozesswärmekollektoren in realisierten und im realen Betrieb befindlichen Anlagen gemessen werden soll. Für die Auswertung und Bewertung der Kollektoren ist eine ausreichend genaue Kenntnis der gemessenen Direktstrahlung notwendig. Wir vergleichen in der folgenden kurzen Untersuchung drei Methoden der Direktstrahlungsmessung

Beschreibung der drei Messmethoden

Methode 1: Pyrheliometer

Die herkömmliche - aber gleichzeitig auch die teuerste - Variante ist die Verwendung eines Pyrheliometers montiert auf einem zweiachsig nachgeführten Trackingsystem. Das ist unsere Referenzmethode. Die Kosten für das Messgerät belaufen sich auf ca. 14'000 €. Diese Kosten übersteigen oft den finanziellen Rahmen eines Feldmonitoring – Projektes. Daher haben wir im Vergleich zur Referenz zwei kostengünstigere Alternativen untersucht.

Methode 2: Global- und Diffusstrahlungsmessung

Bei Methode 2 erfolgt die Bestimmung der Direktstrahlung durch die Messung der Globalstrahlung mit einem Pyranometer und der Diffusstrahlung mit einem Pyranometer mit Schattenring. Aus der Differenz von Global- und Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene und dem Sonnenhöhenwinkel lässt sich der Wert der Direktstrahlung auf eine nachgeführte Ebene bestimmen und mit dem gemessenen Pyrheliometerwert vergleichen.

Methode 3: Messgerät SPN1 von der Fa. DeltaT

Bei Methode 3 haben wir das Strahlungsmessgerät SPN1 der Fa. DeltaT eingesetzt. Es handelt es sich um ein innovatives Strahlungsmessgerät, in das 7 Strahlungssensoren und ein fest installiertes Abschattungselement (innerhalb einer Glaskuppel) eingebaut sind. Das Abschattungselement ist so gestaltet, dass zu jedem Zeitpunkt und Sonnenstand mindestens ein Sensor der direkten Solarstrahlung ausgesetzt ist und ein anderer vollständig abgeschattet ist. Vom Gerät werden die Messwerte der Global- und der Diffusstrahlung ausgegeben. Ausserdem wird die Sonnenscheindauer ebenfalls gemessen, was für unsere Auswertung aber nicht von Belang war.

In Abbildung 1 und 2 sind die verwendeten Geräte dargestellt, wie sie auf dem SPF-Testgelände für die Untersuchung installiert sind.



Abbildung 1: Pyranometer (links), SPN1 (Mitte) und Pyranometer mit Schattenring zur Diffusstrahlungsmessung (rechts)



Abbildung 2: Pyrheliometer auf Meteotracker zur Direktstrahlungsmessung

Zusammenfassung und Kostenübersicht der drei Messmethoden

Messmethode	Messgeräte und Zubehör	Herstellerefirma	Kosten
Methode 1 (Referenz)	1x Pyrheliometer (CHP 1) 1x Meteotracker (SOLYS 2)	Kipp & Zonen	14'160 €
Methode 2	1x Pyranometer (CM-11) 1x Pyranometer (CM-11) mit Schattenring	Kipp & Zonen (K&Z)	5'370 €
Methode 3	1x SPN1	DeltaT (ΔT)	4'760 €

Tabelle 1: Auflistung der Messgeräte der Herstellerefirma und der Kosten für die 3 Messmethoden

Auswertung und Gegenüberstellung der drei Methoden für die Direktstrahlungsmessung (DNI)

Bei den beiden Methoden 2 und 3 werden die Global- und Diffusstrahlung in der horizontalen Ebene gemessen. Daraus kann die Direktstrahlung auf eine zweiachsig nachgeführte Ebene berechnet werden, wenn der Sonnenhöhenwinkel (oder die Sonnenelevation) bekannt ist.

Berechnung der Direktstrahlung aus den horizontalen Strahlungswerten Global- und Diffusstrahlung

Aufgrund der Sonnenzeit und den Koordinaten des Standortes kann der Sonnenelevationswinkel α berechnet werden. Die Bestimmung der Direktstrahlung in der zweiachsig nachgeführten Ebene aus der horizontal gemessenen Global- und Diffusstrahlung erfolgt mit der Formel:

$$I_{DN,calc} = \frac{I_{G,horiz} - I_{d,horiz}}{\sin(\alpha)} \quad \text{Formel 1}$$

$I_{G,horiz}$	Gemessene Globalstrahlung in der horizontalen Ebene
$I_{d,horiz}$	Gemessene Diffusstrahlung in der horizontalen Ebene
$I_{DN,calc}$	Berechnete Direktstrahlung in der zweiachsig nachgeführten Ebene
α	Elevation der Sonne

Diese Umrechnung wird für kleine Sonnenelevationswinkel α sehr ungenau, weil der Nenner sehr klein und bei tiefen Sonnenständen der Messfehler für die Differenz $I_{G,horiz} - I_{d,horiz}$ sehr groß wird. Dies ist auch deutlich in unseren Auswertungen zu erkennen (siehe Abbildung 3). In der Praxis haben diese Messwerte für die Beurteilung der Leistung von konzentrierenden Kollektoranlagen aufgrund des geringen Direktstrahlungsangebotes aber keine Relevanz.

Messwertgegenüberstellungen für die Jahre 2012 und 2013

In den nachfolgenden Diagrammen werden jeweils die relativen Abweichungen zwischen den Werten der Messmethode 1 (=Referenz) und der Methode 2 oder 3 dargestellt. In der Abszissenachse ist immer die mit dem Pyrheliometer gemessene (zweiachsig nachgeführte) Direktstrahlung aufgetragen. In der Ordinatenachse ist die relative Abweichung aus der Differenz der mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung und der jeweilig berechneten Direktstrahlung bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessene Direktstrahlung aufgetragen.

Die Methode 2 wird in den nachfolgenden Diagrammen mit "Kipp & Zonen (K&Z)" bezeichnet, weil die Messgeräte von dieser Firma stammen. Die Methode 3 wird mit SPN1 bezeichnet.

Für die Auswertung liegen alle Daten der kompletten Jahre 2012 und 2013 vor. Dabei ist hervorzuheben, dass für alle Grafiken keine Mittelwerte sondern immer die im Zeitabstand von 10 Sekunden (!) gemessenen Werte verwendet wurden.

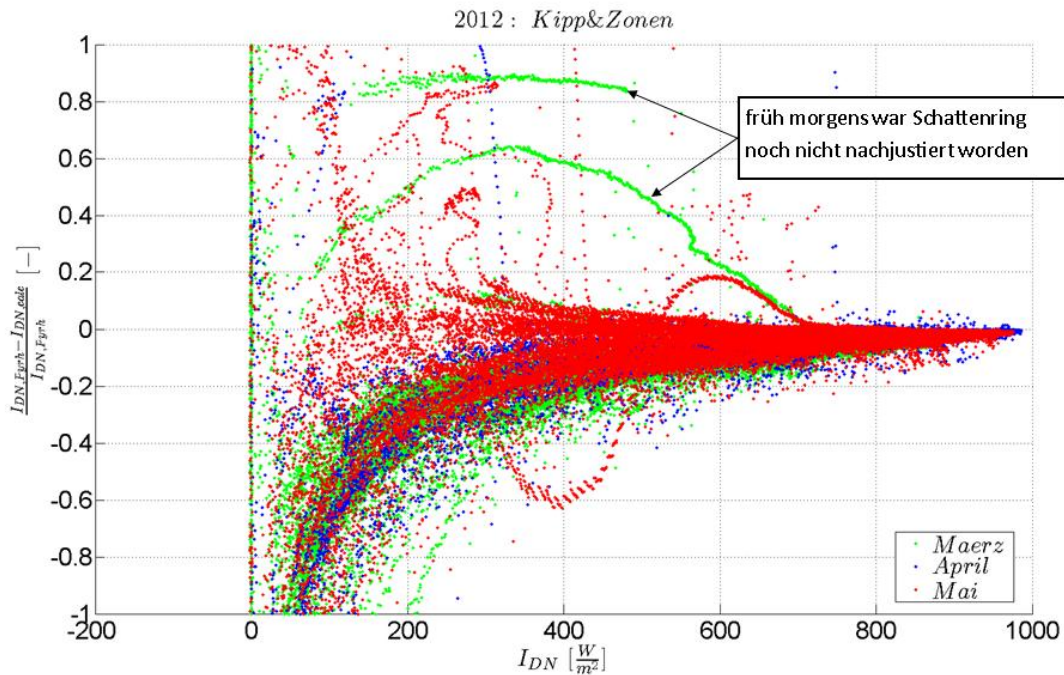


Abbildung 3: Relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung mittels Methode 2 bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung, aufgetragen über den gesamten Intensitätsbereich von 0 bis 1000 W/m² für die Monate März, April und Mai im Jahr 2012

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die relative Abweichung der Methode 2, bezogen auf die herkömmliche Direktstrahlungsmessung, für die Monate März, April und Mai des Jahres 2012. Dabei handelt es sich immer um schöne, sonnige Messtage. Es ist gut zu sehen wie die relative Abweichung bei geringen Strahlungswerten überproportional zunimmt. Dies ergibt sich aufgrund der zuvor beschriebenen Division mit Werten nahe Null, was geringen Einfallswinkeln entspricht. Wirklich interessant für die Praxis ist der Vergleich bei höheren Strahlungswerten, weshalb in den nachfolgenden Grafiken die Abszisse auf 600 bis 1000 Watt pro Quadratmeter beschränkt wurde. Eine Unregelmäßigkeit ist im Monat März an zwei Tagen (12.03.2012, 13.03.2012) und im Mai (17.05.2012) an einem Tag auszumachen. Dabei war der Schattenring des Diffusstrahlungsmessgerätes nicht ordentlich nachjustiert worden, weshalb das Messgerät während eines kurzen Zeitraums, früh morgens, einen Teil der Globalstrahlung gemessen hatte.

In Abbildung 4 zeigt die Auswertung für die Messmethode 2 und das komplette Jahr 2012. Aufgetragen ist die relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung. Alle im 10-Sekundenabstand gemessenen Werte für das gesamte Jahr sind in der Grafik aufgetragen. Die Abszissenachse wurde auf relative Abweichungen von -20% bis +10% eingeschränkt und Ordinatenachse auf Werte zwischen 600 und 1000 W/m². Für den dargestellten Direktstrahlungsbereich (Abszissenachse) wurde eine lineare Regression berechnet. Deren Koeffizienten sind in der Grafik im Titel aufgeführt.

Bei den hohen Direktstrahlungswerten treten die geringsten Abweichungen zwischen der Berechnung und der Messungen auf. Die keilförmige Ausbildung der Datenwolken kommt durch die grössere Ungenauigkeit der berechneten

Direktstrahlung bei kleinen Intensitäten zustande. Aus der Lage der Regressionsgeraden geht hervor, dass z. B. im Bereich von 600 W/m² Direktstrahlung die nach der Methode 2 berechneten Werte im Mittel um etwa 5.7% höher sind als die mit dem Pyrheliometer gemessenen Werte. Bei 800 W/m² sind es 3% und bei 975 W/m² nur noch unter 1%.

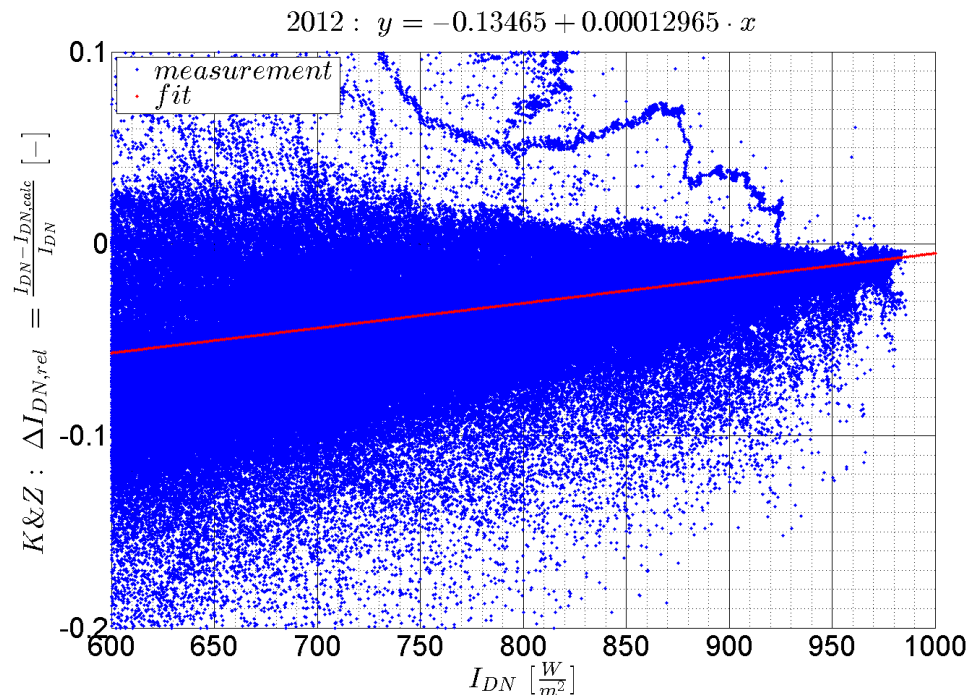


Abbildung 4: relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung mittels Methode 2 bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung, aufgetragen über den eingeschränkten Strahlungsbereich für alle Tage des Jahres 2012

In Abbildung 5 zeigt die Auswertung für das gleiche Jahr für die Messmethode 3, also das SPN1-Messgerät. Qualitativ ergibt sich ein ähnliches Bild. Allerdings ist die Regressionsgrade steiler und bei hohen Werten nicht mehr negativ: Die Abweichung beträgt -9.4% bei 600 W/m², -3.8% bei 800 W/m², und +1.2% bei 975 W/m². Die Form der Datenwolke ist wiederum keilförmig, jedoch etwas „breiter“, worauf später noch eingegangen wird.

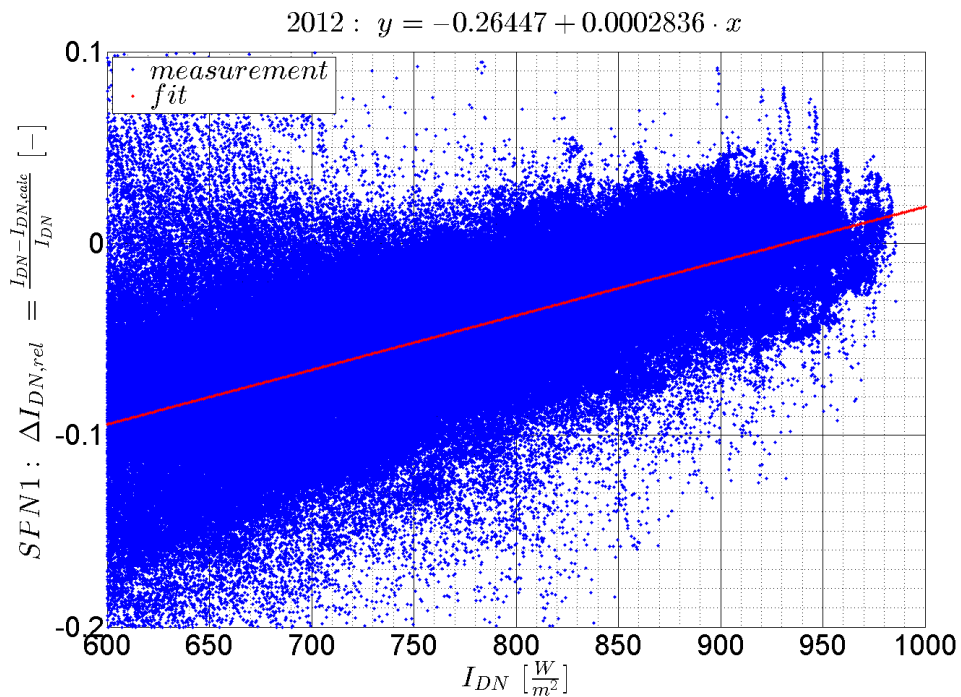


Abbildung 5: relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung mittels Methode 3 bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung, aufgetragen über den eingeschränkten Strahlungsbereich für alle Tage des Jahres 2012

Die Abbildung 6 (Methode 2) und Abbildung 7 (Methode 3) zeigen die gleichen Auswertungen für das Messjahr 2013. Im Prinzip ergeben sich zwischen den beiden Messjahren keine wesentlichen Unterschiede.

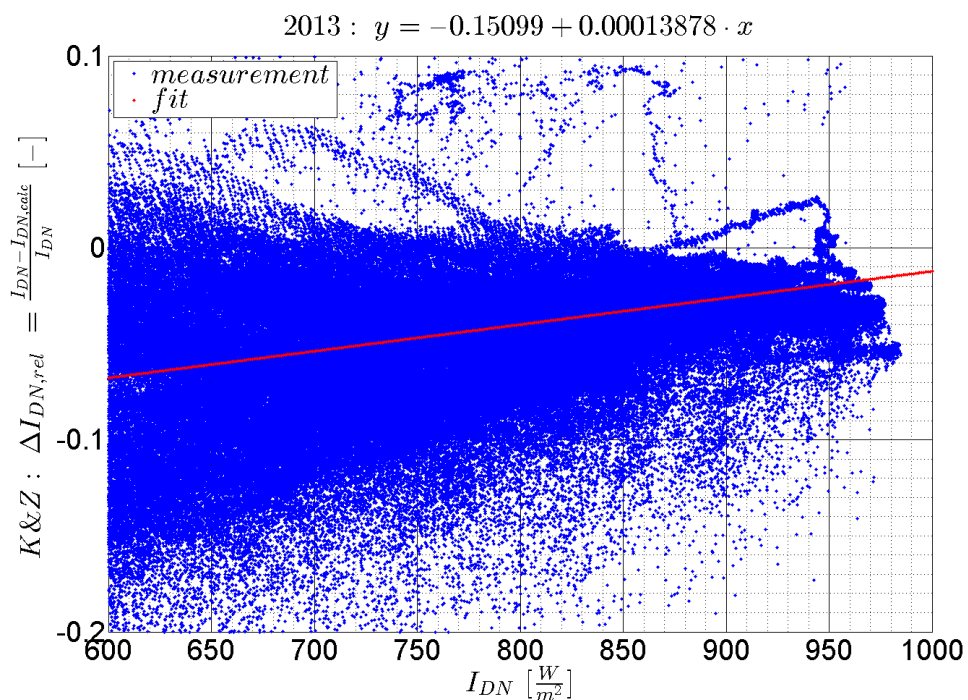


Abbildung 6: relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung mittels Methode 2 bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung, aufgetragen über den eingeschränkten Strahlungsbereich für alle Tage des Jahres 2013

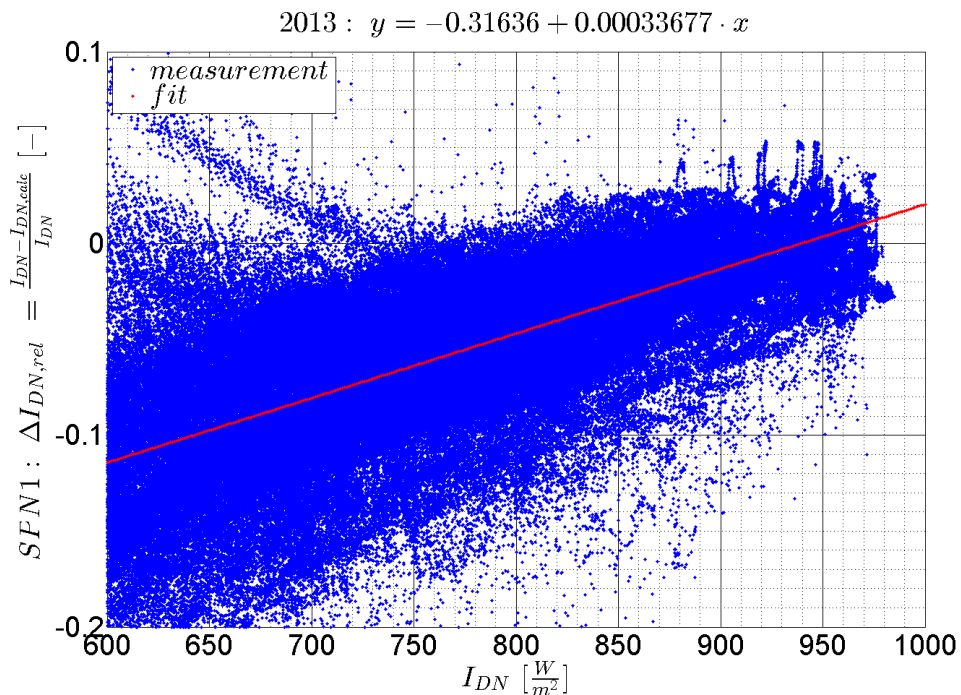


Abbildung 7: relative Abweichung der berechneten Direktstrahlung mittels Methode 3 bezogen auf die mit dem Pyrheliometer gemessenen Direktstrahlung, aufgetragen über den eingeschränkten Strahlungsbereich für alle Tage des Jahres 2013

Aufgrund der grossen Anzahl von Messpunkten und der breiten Streuung der Messpunkte lassen sich aus den Grafiken in Abb. 4 bis 7 keine Aussagen über die Häufigkeitsverteilung der Messpunkte um die Regressionsgerade herum machen. In den folgenden vier Abbildungen (Abbildung 8 bis Abbildung 11) sind deshalb beispielhaft für den Direktstrahlungsbereich von 780 bis 820 W/m^2 die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Abweichungen ermittelt worden. Dies wurde für beide Methoden und für beide Messjahre gemacht.

In diesen Darstellungen lässt sich erkennen, dass die Häufigkeitsverteilung der Messpunkte um die Regressionsgerade herum bei Methode 2 etwas schmäler ist als bei Methode 3. Berechnet man die Varianz σ für alle Messpunkte, die jeweils in den Abbildungen 8 bis 11 enthalten sind, ergibt sich für Methode 2: 2.6% (2012) und 2.5% (2013) und für Methode 3 nur wenig höhere Werte von 2.8% (2012) und 2.9%(2013).

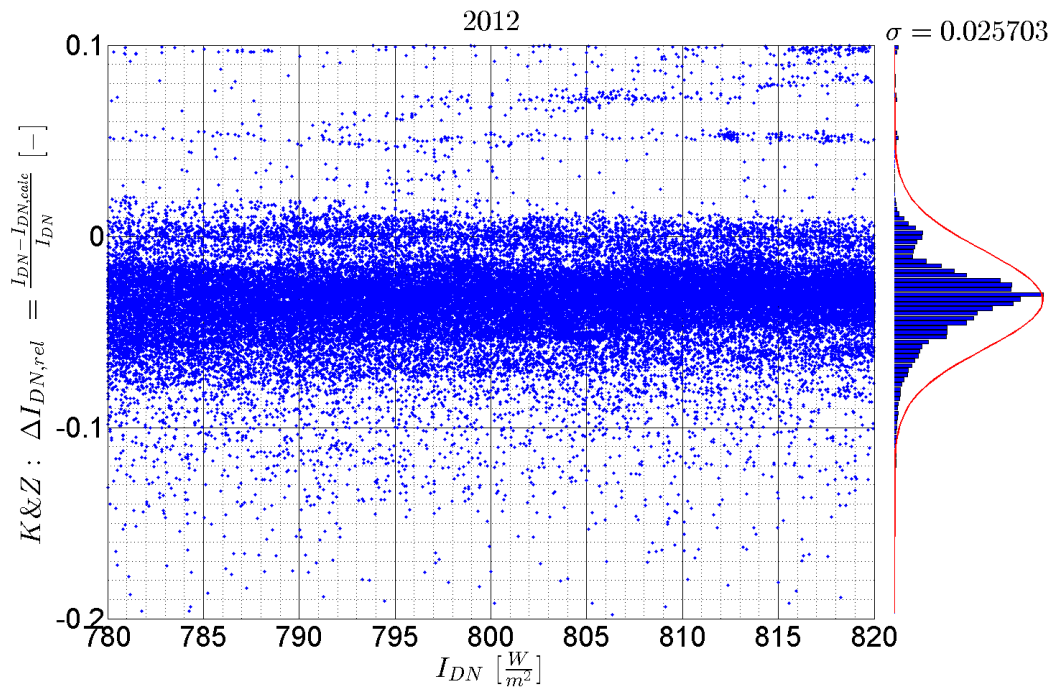


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung für die Methode 2 vom Messjahr 2012

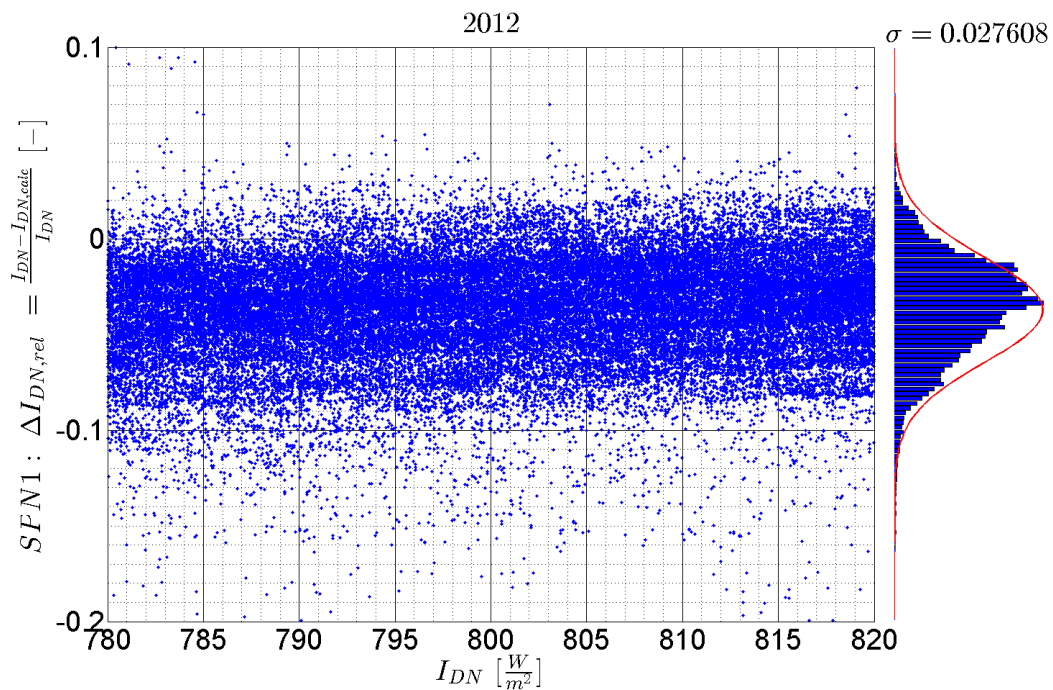


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung für die Methode 3 vom Messjahr 2012

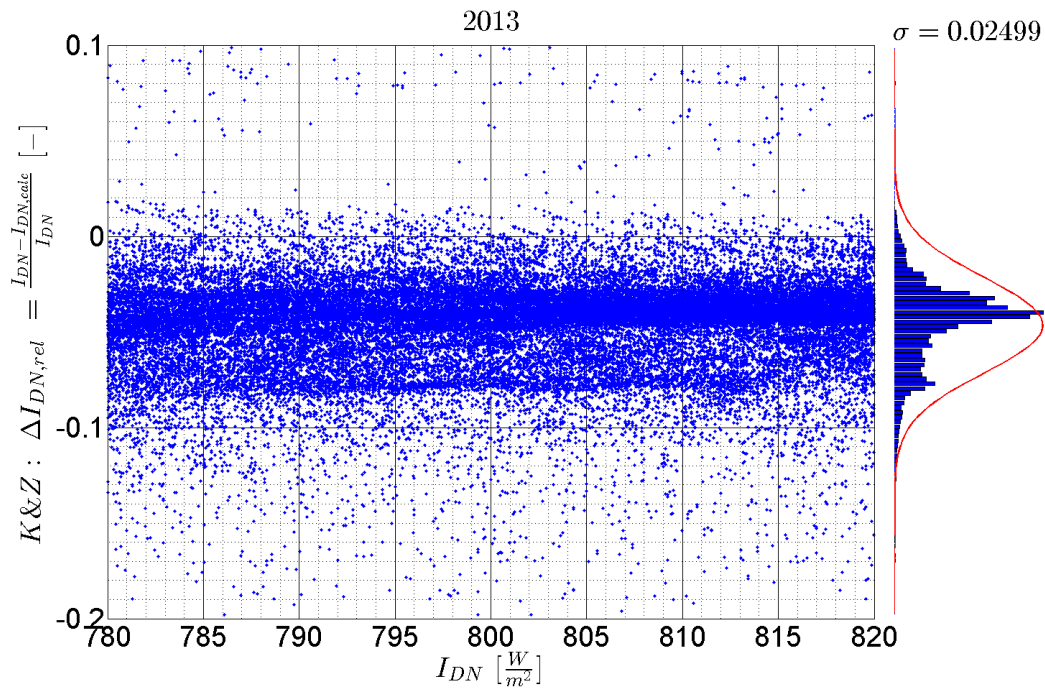


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung für die Methode 2 vom Messjahr 2013

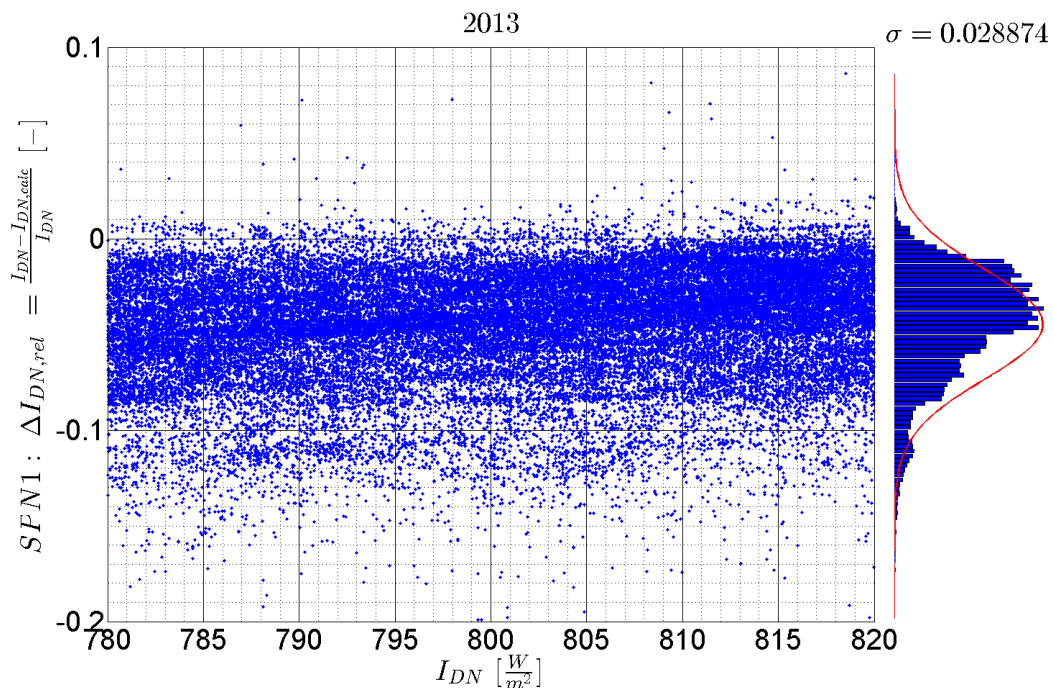


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung für die Methode 3 vom Messjahr 2013

Zusammenfassung

In der Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die Vor- und Nachteile sowie die prozentuale Abweichung der einzelnen Messmethoden nochmals zusammengestellt.

Methode	Vorteile	Nachteile	Abweichungen im Bereich 600 bis 1000 W/m ² DNI
1	<ul style="list-style-type: none"> geringere Verschmutzung (Regendach) unmittelbare Messung der Direktstrahlung bewährtes Messgerät 	<ul style="list-style-type: none"> Teuer (14'160 €) 	("0%"), Referenz
2	<ul style="list-style-type: none"> Preiswert (5'400 €) Bewährte Messgeräte für Global- und Diffusstrahlung 	<ul style="list-style-type: none"> Regelmässige Nachjustierung des Schattenrings notwendig Regelmässige Reinigung der Glasdome 	-6 bis -0.5% Varianz der Häufigkeitsverteilung bei 800 W/m ² etwa +- 2.6%
3	<ul style="list-style-type: none"> Preiswert (4'800 €) Platzsparend, da nur ein Messgerät benötigt wird Keine Nachjustierung nötig 	<ul style="list-style-type: none"> Langlebigkeit unbekannt Regelmässige Reinigung des Glasdome 	-11% bis +2% Varianz der Häufigkeitsverteilung bei 800 W/m ² etwa +- 2.9%

Tabelle 2: Auflistung der Vor- und Nachteile der drei Methoden zur Bestimmung der Direktstrahlung

Folgende Aussagen können festgehalten werden:

1. Aufgrund der Lage der aus den Messungen bestimmten Regressionsgeraden mit beiden alternativen Methoden zur Bestimmung der Direktstrahlung kann man erkennen, dass nur für sehr hohe Werte der Direktstrahlung (>900 W/m²) genaue Messungen gemacht werden können.

2. Die Abweichungen nehmen bei kleineren Direktstrahlungswerten zu und betragen bei 600 W/m² schon 6% (bei Methode 2) und 11% (bei Methode 3). Dabei ergibt die direkte Messung der Direktstrahlung mit dem Pyrheliometer kleinere Werte als die nach Methode 2 und 3 bestimmten Werte.

Im Hinblick auf den Einsatz für das Monitoring von Feldanlagen mit konzentrierenden Kollektoren sehen wir trotzdem Vorteile für die Methode 3 gegenüber Methode 2. Weil hier kein Schattenring in regelmässigen Zeitabständen gewissenhaft nachjustiert werden muss, werden damit in Monitoringprojekten wesentlich zuverlässigere und vollständigere Datensätze erfasst. Die grössere Messungengenauigkeit kann in Kauf genommen werden, insbesondere wenn man sich darüber im Klaren ist, dass die Messungengenauigkeit gross ist. Für die Auswertung der Leistungsfähigkeit von Feldanlagen mit konzentrierenden Kollektoren müssen diese Messunsicherheiten unbedingt berücksichtigt werden.