



UNIVERSITÄT BAYREUTH

Abt. Mikrometeorologie



**Strahlungsmessgerätevergleich
während des Experiments STINHO_1
(24.09. – 12.10.2001)
Projekt VERTIKO, Modul A**

Claudia Liebenthal

**Arbeitsergebnisse
Nr. 21
Bayreuth, Jan. 2003**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Ablauf des Gerätevergleichs	3
2.1	<i>Geräte</i>	4
2.2	<i>Vergleichszeiträume</i>	7
2.3	<i>Durchgeführte Analysen</i>	9
3	Ergebnisse	9
3.1	<i>Synchronisation der Datenerfassungssysteme</i>	10
3.2	<i>Ergebnisse des Pyranometer-Vergleichs</i>	10
3.3	<i>Ergebnisse des Pyrgeometervergleichs</i>	14
3.3.1	Überblick über die Ergebnisse.....	14
3.3.2	Ergebnisse der Eppley PIR Pyrgeometer.....	16
4	Zusammenfassung	21
4.1	<i>Pyranometer</i>	21
4.2	<i>Pyrgeometer</i>	22
5	Testmessungen mit dem Kipp & Zonen CG4	23
6	Ausblick und Danksagung	26
7	Quellen	26

1 Einleitung

Die Messkampagne STINHO1 (**ST**ruktur des turbulenten Transports über **INH**omogener Unterlage) ist Bestandteil des zum Forschungsverbund afo-2000 gehörenden Projekts VERTIKO. Zu den Forschungszielen von VERTIKO heißt es in der zugehörigen Website: "Ziel des Verbundprojektes VERTIKO ist die Messung und Modellierung der Vertikaltransporte in der atmosphärischen Grenzschicht als Flächenmittel über inhomogenem Gelände. Zentrale Frage dabei ist, mit welcher räumlichen und zeitlichen Auflösung welche atmosphärischen Prozesse in Modellen berücksichtigt werden müssen, um die Wechselwirkungen von Landoberflächen und der Atmosphäre adäquat zu erfassen. Oder ob gegebenenfalls auf hohe räumliche Differenzierung verzichtet werden kann, ohne wesentliche Rückkoppelungsprozesse zu vernachlässigen."

Das Feldexperiment STINHO_1 (durchgeführt im Herbst 2001 in Melpitz bei Torgau) diene hierbei hauptsächlich der Vorbereitung des größeren Experiments STINHO_2, das im Frühsommer 2002 in Lindenberg stattfindet. Als Teil dieser Vorbereitungen wurde ein Vergleich der eingesetzten Strahlungsmessgeräte durchgeführt. Ziel dieses Vergleichs ist es, Probleme in den Messungen aufzuspüren und Aussagen über die Zugehörigkeit der Geräte zu Qualitätsklassen zu treffen.

2 Ablauf des Gerätevergleichs

Für den Gerätevergleich, der die kurz- und langwelligen Strahlungskomponenten des oberen Halbraums umfasst, wurden die Messgeräte der teilnehmenden Gruppen während des Experiments STINHO_1 parallel betrieben. Einen Überblick über die Positionierung der einzelnen Geräte gibt Abb. 1. Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messungen sind eine einheitliche Synchronisation der Loggeruhren, eine exakte Ausrichtung der Geräte sowie saubere Gerätedome. Für Aufbau und Betrieb der Geräte- und Loggersysteme sind die jeweiligen Gruppen zuständig. Die Betreuung der Geräte während der Messkampagne (z. B. morgendliche Reinigung) und der Vergleich der Messungen wurde von der Gruppe UBT1 durchgeführt.

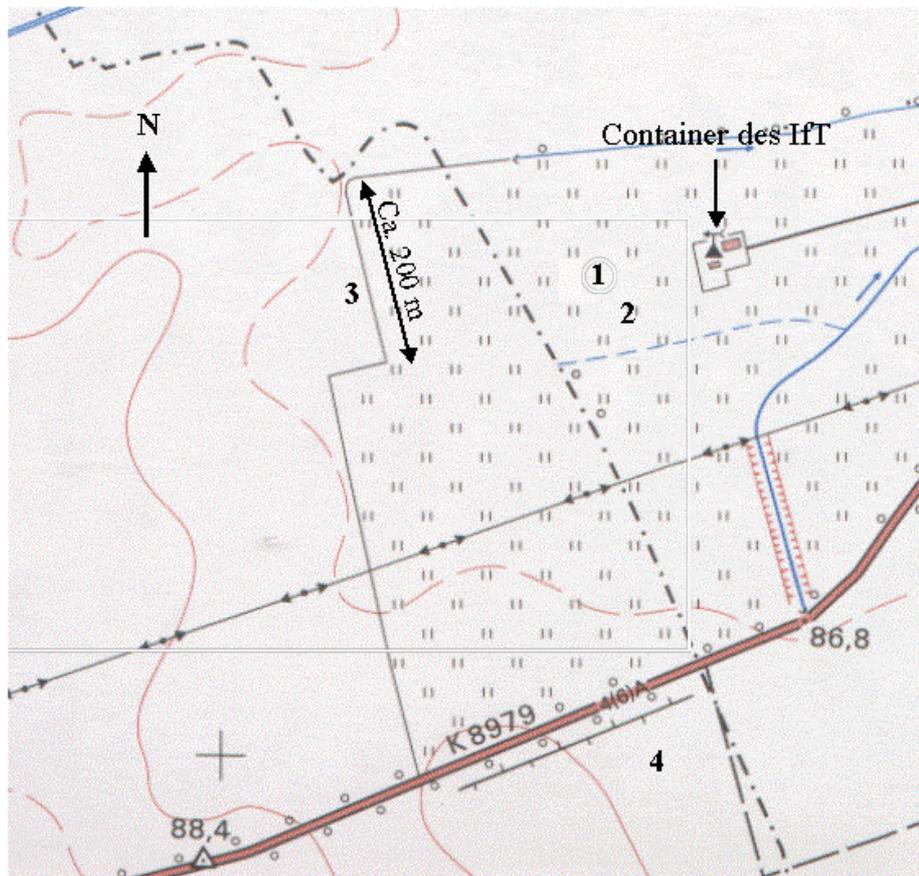


Abb. 1: Anordnung der Strahlungsmessgeräte auf dem Melpitzer Messfeld während des Experiments STINHO_1. - An Standort 1 befanden sich die Geräte des IFT, an den Standorten 3 und 4 die Geräte der Gruppe UBT1 (Standort 3: CM14(CM11)/UBT1 und Eppley/UBT1, Standort 4: CNR1/UBT1). Alle anderen Geräte waren an Standort 2 aufgebaut.

2.1 Geräte

Einen Überblick über die am Strahlungsvergleich teilnehmenden Gruppen und Geräte geben Tab. 1 und Tab. 2. Bei den Pyranometern sind zwei Geräteklassen vertreten: Zum einen Sensoren der Klasse „secondary standard“, zum anderen Sensoren der Klasse „second class“ (Klassifizierung nach Kasten (1985)). Dabei gehören die Geräte der Typen CM21 und CM11 zur Klasse „secondary standard“, die Geräte vom Typ CM3 zur Klasse „second class“ (Zuordnung laut Herstellerangaben).

Bei der Messung der langwelligigen Strahlung kamen folgende Gerätetypen zum Einsatz: Eppley-Pyrgeometer (incl. drei Thermistoren zur Bestimmung der Domtemperaturen), Pyrgeometer der Typen CG1 und CG3 und ein Gerät nach Schulze/Däke. Eine Klassifikation ähnlich derjenigen für kurzwellige Messgeräte existiert für die Messgeräte langwelliger Strahlung nicht. Die Pyrgeometer vom Typ Eppley PIR sollten jedoch wesentlich höhere Anforderungen erfüllen als die Geräte der Typen CG1 und CG3 bzw. Schulze/Däke. Alle Pyrgeome-

ter wurden vor den Vergleichsrechnungen body-korrigiert. Die Eppley-Pyrgeometer wurden zusätzlich dome-korrigiert; es wurden die Korrekturbeziehungen nach Philipona et al. (1995) verwendet. Die zugehörigen Kalibrierfaktoren sind in Tab. 2 aufgelistet.

Als Zeitbasis des Strahlungsmessgerätevergleichs dient die Mittlere Ortszeit (MOZ), auf die alle Geräte synchronisiert werden sollten. Die Messwerte wurden jede Sekunde erfasst und als 1 min-Mittelwerte gespeichert (Ausnahme: Gerät CM3 der Gruppe TUBAF: Messwerterfassung alle 15 s, Speicherung als 2 min-Mittelwerte).

Tab. 1: Beim Strahlungsvergleich eingesetzte Pyranometer.

Gruppe	Gerät	Seriennummer	Kauf	Kalibrierung (letzte)	Kalibrierfaktor ($\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$)
ALUF1	Kipp und Zonen Pyranometer CM21	000758	2000	bei Kauf (Werkskal.)	11.39
DWD1	Kipp und Zonen Pyranometer CM24(CM21)	970392	1997	26.01.01	12.09
IFT	Kipp und Zonen Pyranometer CM11	913570	1991	bei Kauf (Werkskal.)	-
TUBAF	Kipp und Zonen Pyranometer CM3	982188	1998	bei Kauf (Werkskal.)	15.18
TUD	Kipp und Zonen Pyranometer CM21	940223	1994	07.06.00	12.05
	Kipp und Zonen CNR1 (Typ CM3)	980126	1998	bei Kauf (Werkskal.)	11.69
UBAS	Kipp und Zonen Pyranometer CM21	910004	1991	08.04.97	12.54
UBT1	Kipp und Zonen Pyranometer CM14(CM11)	970106	1997	09.06.97 (bestätigt 2002)	4.85
	Kipp und Zonen CNR1 (Typ CM3)	970059	1997	20.10.97 (bestätigt 2002)	9.91

Tab. 2: Beim Strahlungsvergleich eingesetzte Pyrgeometer. - Es erfolgte entweder nur eine Body-Korrektur oder eine kombinierte Body- und Dome-Korrektur nach Philipona et al. (1995). Als Kalibrierfaktoren sind der Faktor C (zur Umrechnung des Spannungssignals in $W\ m^{-2}$) sowie die Faktoren k1, k2 und k3 (zur Durchführung der Korrektur nach Philipona et al. (1995)) angegeben.

Gruppe	Gerät	Seriennummer	Kauf	Kalibrierung (letzte)	Korrektur	C ($\mu V\ W^{-1}\ m^2$)	k1	k2	k3
ALUF1	Kipp und Zonen CG1	000203	2000	bei Kauf (Werkskal.)	body	13.93	-	-	-
DWD1	Eppley Pyrgeometer, drei Domtemperaturen	32000F3	1997	26.03.98 bestätigt 03/2001 durch MOP/DWD	Philipona	3.807	0.008	0.999	2.677
IFT	Gerät nach Schulze/Däke	310284	1991	bei Kauf (Werkskal.)	body	-	-	-	-
TUD	Eppley Pyrgeometer, drei Domtemperaturen	30473F3	1994	19.03.97	Philipona	3.270	-0.0144	0.9985	3.632
	Kipp und Zonen CNR1 (Typ CG3)	980126	1998	bei Kauf (Werkskal.)	body	11.69	-	-	-
UBAS	Eppley Pyrgeometer, drei Domtemperaturen	31207F3	1996	28.05.98	Philipona	3.66	0.1077	1.0013	3.22
UBT1	Eppley Pyrgeometer, drei Domtemperaturen	32006F3	1997	28.08.01	Philipona	3.75	-0.016	0.9997	3.056
	Kipp und Zonen CNR1 (Typ CG3)	970059	1997	20.10.97 (bestätigt 2002)	body	9.91	-	-	-

2.2 Vergleichszeiträume

Für den Vergleich der Pyranometer werden möglichst wolkenlose Bedingungen benötigt. Während der Messperiode herrschten insgesamt an nur vier Tagen über mehrere Stunden hinweg wolkenlose Bedingungen (29.09., 06.10., 08.10. und 10.10.01). An diesen Tagen wurde die Zeit vom morgendlichen Reinigen der Geräte bis zum Aufzug von Wolken bzw. am 10.10.01 bis zum Abbau der ersten Geräte für den Pyranometervergleich verwendet (Überblick über die verwendeten Zeiträume in Tab. 3).

Tab. 3: Für den Strahlungsvergleich verwendete Zeiträume (Pyranometer).

Tag	genutzter Zeitraum	Datenlücken	
		Gerät	Zeitraum
29.09.01	08:51 - 10:00	TUBAF, CM3	komplett
06.10.01	08:51 - 13:30	UBAS, CM21	09:49 - 10:04
		UBAS, CM21	10:46
		UBAS, CM21	10:50
		UBAS, CM21	11:15
		TUBAF, CM3	11:47 - 11:50
08.10.01	08:41 - 08:55	-	-
	09:06 - 09:55	-	-
10.10.01	07:51 - 09:05	UBT1, CNR1	08:18 - 09:05

Für den Vergleich der Pyrgeometer wurden die gleichen Tage wie für den Pyranometervergleich verwendet. Allerdings musste hier keine Rücksicht auf die Bewölkungsverhältnisse genommen werden, so dass der Zeitraum zwischen Reinigung der Geräte und abendlichem Taufall (bzw. Abbau der Geräte am 10.10.01) genutzt werden konnte (Überblick über die verwendeten Zeiträume in Tab. 4).

Tab. 4: Für den Strahlungsvergleich verwendete Zeiträume (Pyrgeometer).

Tag	genutzer Zeitraum	Datenlücken	
		Gerät	Zeitraum
29.09.01	07:31 - 16:02	TUD, Eppley	11:03
	16:08 - 17:30	-	-
06.10.01	07:46 - 10:45	-	-
	11:46 - 17:30	-	-
08.10.01	08:01 - 17:30	TUD, CNR1	08:01 - 09:30
		UBT1, CNR1	08:01 - 09:30
		DWD1, Eppley	15:16
10.10.01	07:51 - 11:00	UBT1, CNR1	ab 08:18
		DWD1, Eppley	ab 09:10
		UBAS, Eppley	10:39

Sowohl bei den Pyranometern als auch bei den Pyrgeometern mussten für einzelne Geräte bestimmte Datenpunkte aus der Auswertung genommen werden (Spalte „Datenlücken“ in Tab. 3 und Tab. 4). Grund hierfür sind Geräteausfälle oder stark abweichende Messwerte. Es ergibt sich eine von Gerät zu Gerät unterschiedliche Anzahl von in den Vergleich eingegangenen 1 min-Mittelwerten (Tab. 5).

Tab. 5: Anzahl der verwendeten 1 min-Mittelwerte (für TUBAF: 2 min-Mittelwerte).

Gruppe	Pyranometer		Pyrgeometer	
	Gerät	Datenpunkte	Gerät	Datenpunkte
ALUF1	CM21	490	CG1	1880
DWD1	CM24(CM21)	490	Eppley	1769
IFT	CM11	490	Gerät nach Schulze/Däke	1880
TUBAF	CM3	208	-	-
TUD	CM21	490	Eppley	1879
	CNR1	490	CNR1	1790
UBAS	CM21	471	Eppley	1880
UBT1	CM14(CM11)	490	Eppley	1880
	CNR1	442	CNR1	1687

2.3 Durchgeführte Analysen

Da die Datenerfassung dezentral durch die jeweilige Gruppe erfolgte, muss die Synchronisation der Loggeruhren überprüft werden. Dies erfolgte mittels Berechnung von Kreuzkorrelationen durchgeführt.

Für den Vergleich der kurz- und langwelligen Komponente wurde je ein Referenzgerät gewählt. Ausschlaggebend hierfür waren die Gerätequalität und die Aktualität der Kalibrierung. Daraus ergab sich die Wahl folgender Referenzgeräte: CM24(CM21)/DWD1 für die kurzwellige Komponente und Eppley PIR/UBT1 für die langwellige Komponente. Die restlichen Geräte wurden über Scatterplots zu den Referenzgeräten in Beziehung gesetzt. Als Parameter zur Charakterisierung der Übereinstimmung zwischen den Geräten werden Steigung (a), Achsenabschnitt (b) und Bestimmtheitsmaß (r^2 bzw. R^2) der Ausgleichsgeraden verwendet.

Die Analyse der langwelligen Strahlungsdaten zeigte erhebliche Probleme bei den Eppley-Geräten auf. Deshalb wurden für diese Sensoren nicht nur Scatterplots der Enddaten betrachtet, sondern auch die Tagesverläufe und Häufigkeitsverteilungen der Geräteabweichungen.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden nur ausgewählte Diagramme gezeigt (z. B. nur 1 Scatterplot pro Gerätetyp). Die Parameter aller Vergleiche sind aus den zugehörigen Tabellen ersichtlich.

3.1 Synchronisation der Datenerfassungssysteme

Zur Feststellung, ob alle Systeme ausreichend synchronisiert waren, wurden die Kreuzkorrelationen der kurzweiligen Strahlungsdaten betrachtet (Tab. 6). Alle Komplexe (außer TUBAF) zeigen ohne Zeitversatz die höchste Kreuzkorrelation mit dem Referenzgerät (DWD1). Das System der Gruppe TUBAF zeigte die höchste Korrelation bei einem Zeitversatz von +6 min. ('+6 min' bedeutet hierbei, dass die Uhr des TUBAF-Systems um 6 Minuten gegenüber dem Referenzsystem DWD1 vor ging.) Wodurch dieser Versatz begründet ist, konnte bislang nicht geklärt werden. Für alle Analysen wurden die Daten von TUBAF um 6 min gegenüber den anderen Komplexen verschoben.

Tab. 6: Überblick über die Kreuzkorrelationen bei unterschiedlichem Versatz zum Referenzsystem (DWD1). - '+1min' bedeutet hierbei, dass die Uhr des jeweiligen Messsystems gegenüber dem Referenzsystem um eine Minute vorging. Das Maximum der Korrelation ist fett hervorgehoben.

kw	0min	+1min	+2min	+3min	-1min	-2min	-3min
ALUF1	0.9996	0.9991	0.9954	0.9943	0.9968	0.9959	0.9948
IFT	0.9988	0.9988	0.9975	0.9962	0.9974	0.9963	0.9952
TUBAF	0.9771	0.9787	0.9795	0.9807	+4min 0.9819	+5min 0.9832	+6min 0.9834
TUD	0.9992	0.9991	0.9978	0.9966	0.9974	0.9958	0.9940
UBAS	0.9971	0.9967	0.9957	0.9951	0.9951	0.9933	0.9913
UBT1	0.9971	0.9965	0.9954	0.9943	0.9968	0.9959	0.9948

3.2 Ergebnisse des Pyranometer-Vergleichs

Der Pyranometer-Vergleich umfasst Geräte der Typen CM21, CM11 und CM3. Als Referenzgerät wird das Pyranometer CM24(CM21) der Gruppe DWD1 verwendet, da seine Kalibrierung zuletzt im März 2001 überprüft worden ist.

Alle untersuchten CM21-Geräte (Klasse "secondary standard") unterschätzen die Globalstrahlung gegenüber dem Referenzgerät (z. B. CM21/ALUF, Abb. 2). Die Unterschätzung beträgt zwischen 1.3 % und 4.7 %. Dabei sind die Streuungen sehr niedrig (r^2 zwischen 0.9993 und 0.9995). Auch die Geräte vom Typ CM11 (ebenfalls Klasse "secondary standard") unterschätzen die Globalstrahlung gegenüber dem Referenzgerät um 2.2 % bzw. 2.4 %. Der Achsenabschnitt der Regression befindet sich im gleichen Bereich wie bei den CM21-Geräten, die Streuung liegt höher (z. B. Pyranometer CM11/lFT, Abb. 3).

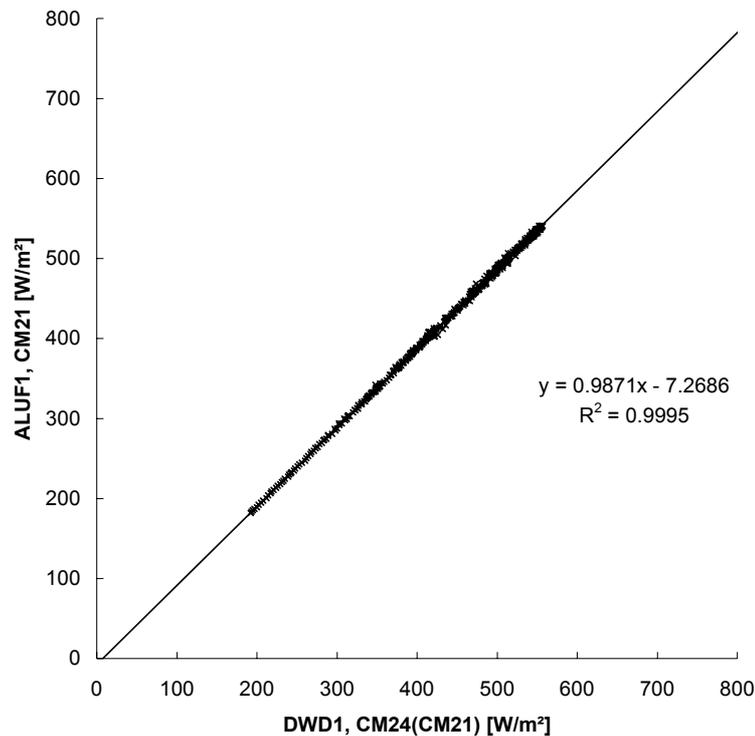


Abb. 2: Scatterplot der Geräte CM24(CM21)/DWD1 und CM21/ALUF1.

Zu einer tieferen Qualitätsstufe als die beiden oben betrachteten Gerätetypen gehören die Pyranometer vom Typ CM3 ("second class"), die die Globalstrahlung ebenfalls unterschätzen. Abb. 4 zeigt dies am Beispiel des Geräts CNR1/UBT1.

Ein Grund dafür, dass die Werte des Referenzgeräts CM24(CM21)/DWD1 über denen aller anderen Geräten liegen, könnte der verwendete Kalibrierfaktor sein, der vom 26.01.01 stammt (Tab. 1). Sowohl der 1997 festgestellte Kalibrierfaktor als auch derjenige aus 2002 sind höher (12.20 bzw. 12.21) als der 2001 ermittelte (12.09). Daher wurde der Vergleich auch unter Verwendung eines Faktors von 12.20 durchgeführt. Einen Überblick über die Koeffizienten aller Vergleiche geben Tab. 7 (Kalibrierfaktor: 12.09) und Tab. 8 (Kalibrierfaktor: 12.20).

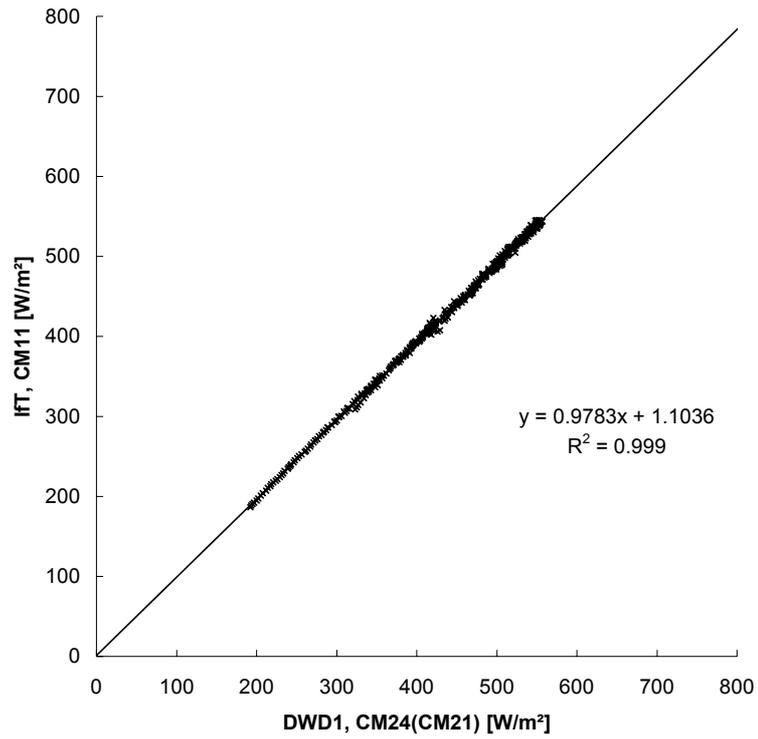


Abb. 3: Scatterplot der Geräte CM24 (CM21)/DWD1 und CM11/IFT.

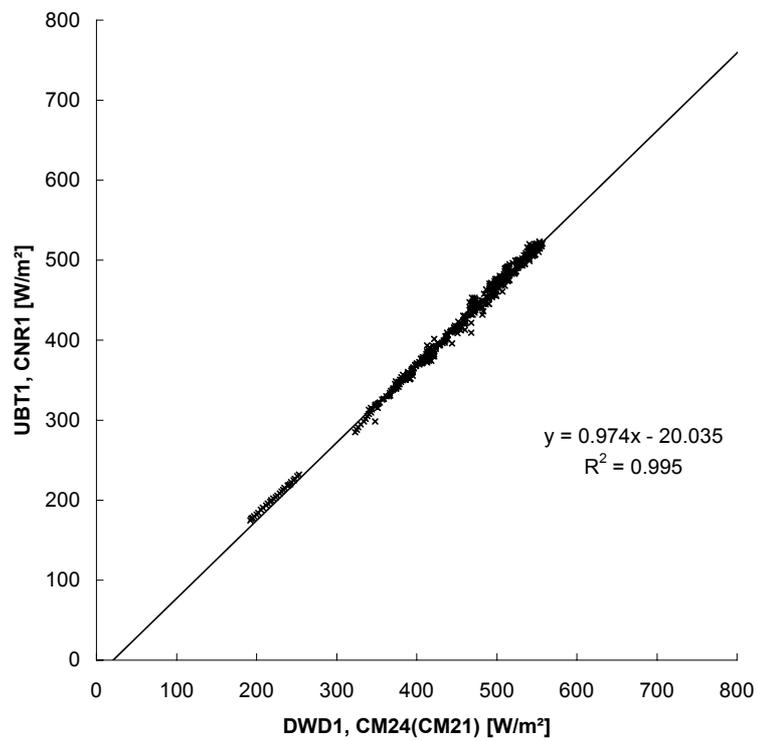


Abb. 4: Scatterplot der Geräte CM24 (CM21)/DWD1 und CNR1/UBT1.

Tab. 7: Koeffizienten des Pyranometervergleichs (Kalibrierfaktor CM24(CM21)/DWD1: 12.09).

Gerät	Steigung a	Achsen- abschnitt b	Bestimmt- heitsmaß r²
ALUF1, CM21	0.987	-7.27	0.9995
TUD, CM21	0.953	-5.44	0.9994
UBAS, CM21	0.957	-1.95	0.9984
IFT, CM11	0.978	+1.10	0.9990
UBT1, CM14(CM11)	0.976	+4.58	0.9979
TUBAF, CM3	0.927	+4.07	0.9897
TUD, CNR1	0.915	+26.06	0.9967
UBT1, CNR1	0.974	-20.04	0.9950

Tab. 8: Koeffizienten des Pyranometervergleichs (Kalibrierfaktor CM24(CM21)/DWD1: 12.20).

Gerät	Steigung a	Achsen- abschnitt b	Bestimmt- heitsmaß r²
ALUF1, CM21	0.977	-7.27	0.9995
TUD, CM21	0.963	-5.44	0.9994
UBAS, CM21	0.969	-1.95	0.9984
IFT, CM11	0.988	+1.10	0.9990
UBT1, CM14(CM11)	0.985	+4.58	0.9979
TUBAF, CM3	0.937	+4.07	0.9897
TUD, CNR1	0.924	+26.06	0.9967
UBT1, CNR1	0.984	-20.04	0.9950

3.3 Ergebnisse des Pyrgeometervergleichs

3.3.1 Überblick über die Ergebnisse

Bei den Pyrgeometern kamen vier Gerätetypen zum Einsatz: vier Geräte vom Typ Eppley PIR mit je drei Thermistoren zur Erfassung der Domtemperaturen, ein CG1-Gerät, CG3-Geräte und ein Gerät nach Schulze/Däke. In Tab. 2 ist angegeben, welche Korrektur(en) auf die jeweiligen Daten angewendet wurde(n). Es wurde keine f-Korrektur durchgeführt; diese war aufgrund der schlechten Witterung nicht notwendig. Die Korrekturparameter können ebenfalls aus Tab. 2 ersehen werden.

Als Referenzgerät wurde das Eppley-Pyrgeometer der Gruppe UBT1 ausgewählt, da es das zuletzt kalibrierte ist (August 2001). Die Eppley-Pyrgeometer wurden mit den nach Philipona et al. (1995) korrigierten Werten verglichen. Für die CG1- und CG3-Geräte wurden die Vergleiche sowohl mit den body-korrigierten als auch den nach Philipona et al. (1995) korrigierten Werten des Eppley/UBT1 durchgeführt.

Alle Eppley-Geräte zeigen deutlich von Null verschiedene Achsenabschnitte (zwischen -15.56 für Eppley/DWD und -61.37 für TUD). Als Beispiel ist der Vergleich der Geräte Eppley/UBT1 und Eppley/UBAS gezeigt (Abb. 5).

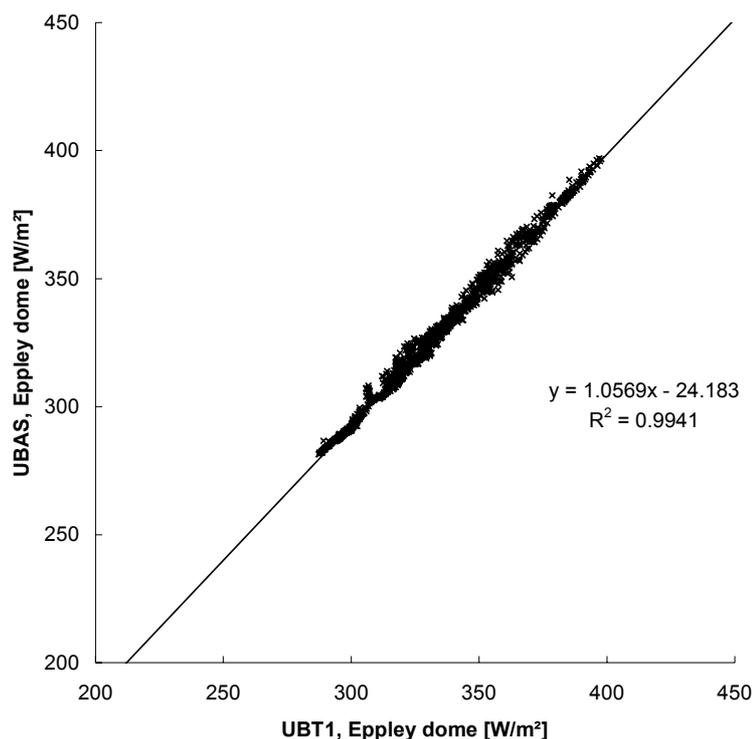


Abb. 5: Scatterplot der Geräte Eppley/UBT1 und Eppley/UBAS.

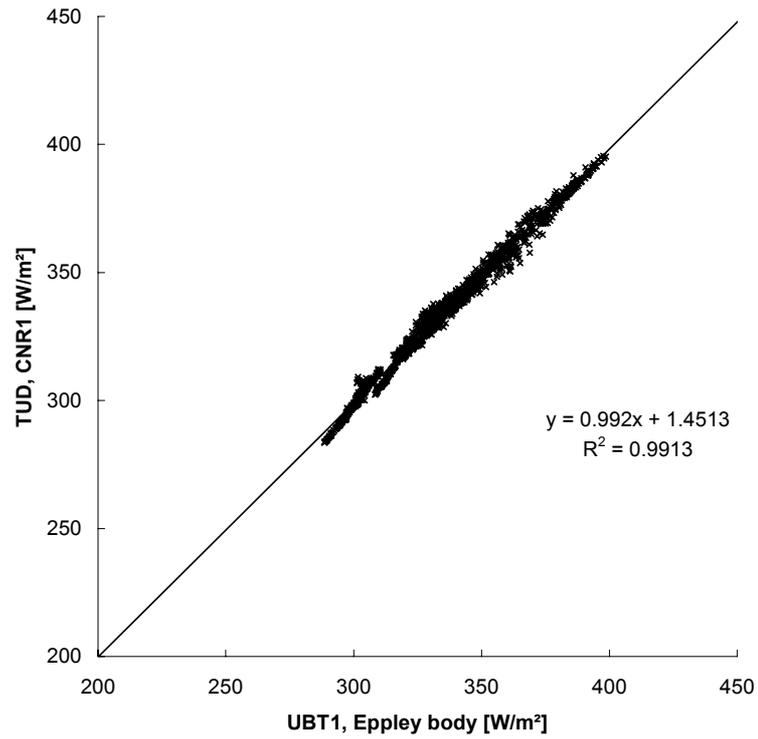


Abb. 6: Scatterplot der Geräte Eppley/UBT1 (nur body-korrigiert) und CNR1/TUD.

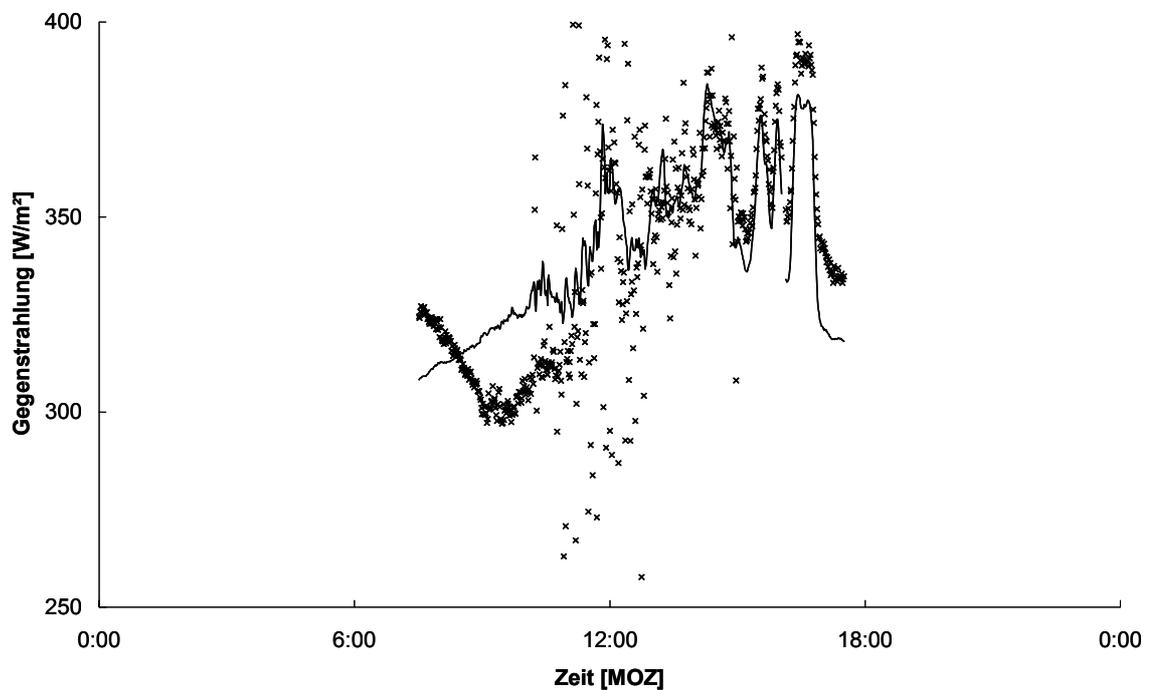


Abb. 7: Anzeige des Geräts nach Schulze/Däke/lFT am 29.09.01. - Das Gerät nach Schulze/Däke/lFT ist durch Punkte, das Referenzgerät als Linie wiedergegeben.

Die Fits der CG1- und CG3-Geräte zeigen geringere Achsenabschnitte als die Eppley-Pyrgeometer, streuen allerdings stärker (in Abb. 6 dargestellt für das Gerät CNR1/TUD). Ein sinnvoller Vergleich des Geräts nach Schulze/Däke der Gruppe IfT war nicht möglich, da das Gerät stark variierte und offensichtlich Störeinflüsse vorhanden waren (Abb. 7). Eine Überprüfung des Geräts ergab einen Defekt der Beschichtung des Doms; der Sensor wurde inzwischen ausgetauscht.

Die Vergleichsparameter aller Geräte sind in Tab. 9 zusammengefasst. Man kann erkennen, dass die CG1- und CG3-Geräte recht ordentlich arbeiten; bei den Eppley-Geräten dagegen liegen eindeutig Probleme vor. Mit deren Analyse beschäftigt sich das folgende Kapitel.

Tab. 9: Koeffizienten des Pyrgeometervergleichs. - In mit einem Stern versehenen Zeilen wurde mit den body-korrigierten Werten des Geräts Eppley/UBT1 verglichen, in allen anderen mit den body- und dome-korrigierten Werten.

Gerät	Steigung a	Achsen- abschnitt b	Bestimm- theitsmaß r ²
DWD1, Eppley	1.037	-15.56	0.9953
TUD, Eppley	1.106	-61.37	0.9947
UBAS, Eppley	1.057	-24.18	0.9941
ALUF1, CG1*	1.027	-12.52	0.9915
ALUF1, CG1	1.024	-9.46	0.9880
TUD, CNR1*	0.992	+1.45	0.9913
TUD, CNR1	0.990	+3.94	0.9887
UBT1, CNR1*	0.984	+4.03	0.9767
UBT1, CNR1	0.978	+7.86	0.9764

3.3.2 Ergebnisse der Eppley PIR Pyrgeometer

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde und aus den Koeffizienten des Pyrgeometervergleichs zu ersehen ist (Tab. 9), gab es beim Vergleich der Eppley PIR Pyrgeometer massive Probleme. Die Messungen der vier miteinander verglichenen Geräte weichen zum Teil erheblich voneinander ab. Um die Ursachen für diese Abweichungen zu ergründen, wurden weitere Datenanalysen durchgeführt: Zusätzlich zu den Scatterplots wurden auch die Tagesverläufe der Abweichungen sowie ihre Häufigkeitsverteilungen betrachtet. Darüber hinaus wurden die Daten auf allen Stufen ihrer Erfassung und Korrektur verglichen: Zuerst wurde der Quotient aus dem vom Thermoelement erzeugten Spannungsausgang und dem Kalibrierkoeffizienten C betrachtet. Diese Größe (hier be-

zeichnet mit I^*) entspricht der langwelligen Strahlungsbilanz des Sensors. Anschließend wurden die body-korrigierten Größen (I_{body}) sowie die nach Philipona et al. (1995) korrigierten Größen (I_{dome}) verglichen. In Abb. 8 sind die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen aller Geräte zusammengefasst. In den Spalten finden sich alle Diagramme je eines Geräts, in den Zeilen finden sich alle Diagramme je eines Bearbeitungsschritts. Die Abweichungen zum Referenzgerät (UBT1) wurden klassifiziert und die absolute und relative Häufigkeit jeder Abweichungsklasse ermittelt. Dabei wurden die Klassengrenzen den jeweils tatsächlich vorliegenden Abweichungen angepasst; die Klassenmitten (in W m^{-2}) sind in Abb. 8 auf der Abszisse skaliert. Die absoluten Häufigkeiten der in die jeweilige Klasse fallenden Abweichungen sind als Balken dargestellt und auf der linken Ordinate skaliert; die kumulative relative Häufigkeit ist als durchgezogene Linie dargestellt und auf der rechten Ordinate (in %) skaliert.

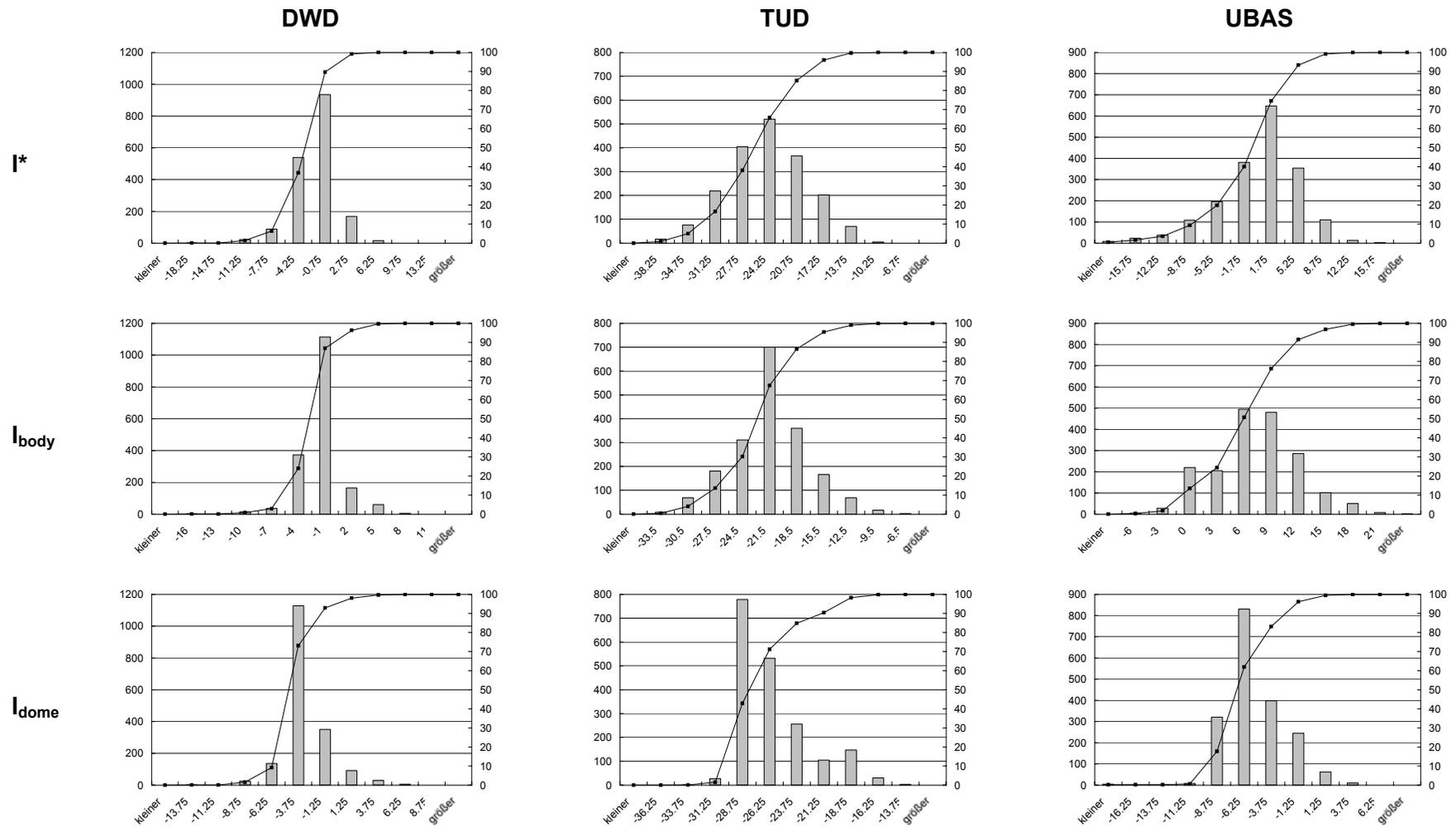


Abb. 8: Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der verschiedenen Eppley PIR Geräte zum Referenzgerät. - Erläuterungen siehe Fließtext. Abszisse - Klassenmitte der Abweichungen [$W m^{-2}$], linke (rechte) Ordinate - absolute (relative) Häufigkeit der Klasse [-] ([%]).

Zusätzlich wurden die Größen 'bias' und 'comparability' der einzelnen Werte herangezogen (Tab. 10). Dabei entspricht der 'bias' eines Gerätes dem Mittelwert der Abweichungen zum Referenzgerät, die 'comparability' entspricht dem root mean square (rms) der Abweichungen zum Referenzgerät.

Tab. 10: Bias und comparability der im Strahlungsvergleich betrachteten Eppley PIR-Geräte.

		DWD1	TUD	UBAS
I*	bias [W m ⁻²]	-1.93	-24.50	+0.29
	comparability [W m ⁻²]	+3.30	+25.02	+5.18
I_{body}	bias [W m ⁻²]	-1.50	-21.40	+7.37
	comparability [W m ⁻²]	+2.64	+21.80	+8.69
I_{dome}	bias [W m ⁻²]	-3.17	-26.00	-5.29
	comparability [W m ⁻²]	+3.76	+26.22	+5.91

Sowohl die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen (Abb. 8) als auch der Vergleich der Größen 'bias' und 'comparability' (Tab. 10) belegen, dass die Abweichungen der Pyrgometer DWD1 und UBAS für I* in einer Größenordnung liegen, die als tatsächlich vorhandene Unterschiede aufgefasst werden können. Schließlich hängt die langwellige Strahlungsbilanz der einzelnen Sensoren unter anderem von Geräteeigenschaften ab. Diese Unterschiede müssten aber schon durch die body-Korrektur weitgehend verschwinden und durch die Philipona-Korrektur vollständig aufgehoben werden. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Der Betrag von bias und comparability der Größe I_{dome} ist in allen Fällen deutlich größer als der von I*. Für den Sensor TUD existiert schon in der gemessenen langwelligen Strahlungsbilanz des Geräts (I*) ein Problem. Aber auch hier wird der Fehler durch die Philipona-Korrektur vergrößert. Hauptgrund für die Abweichungen der Geräte untereinander sind somit die angebrachten Korrekturen, wobei entweder die Korrekturen an sich oder die Messung der hier verwendeten Temperaturen mit den im Eppley PIR integrierten Thermistoren fehlerhaft sein können. Somit ist der nächste Schritt ein Vergleich der mit den eingebauten Body- und Dome-Thermistoren gemessenen Temperaturen.

Dazu wurden die gleichzeitig von den Thermistoren der verschiedenen Geräte gemessenen Temperaturen verglichen (Abb. 9). Die Diagramme zeigen (links oben startend, im Uhrzeigersinn): Body-Temperatur, Dome-Temperatur Südost, Dome-Temperatur Südwest und Dome-Temperatur Nord. (Weitere Erläuterungen siehe Abbildungsbeschriftung.) Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die vier Diagramme nicht dieselben Daten zeigen, obwohl sie sich zum Verwechseln ähnlich sehen.

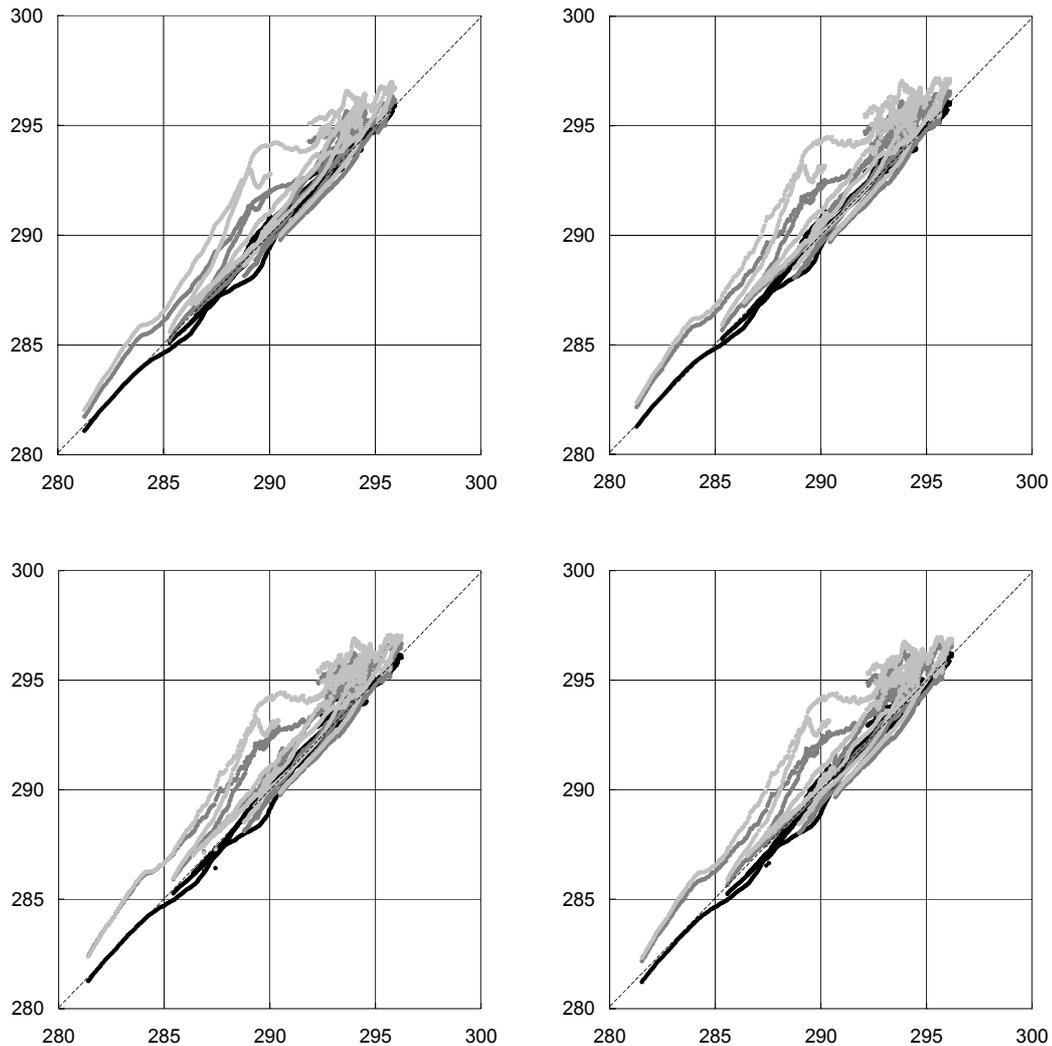


Abb. 9: Scatterplots der von den Thermistoren gemessenen Temperaturen. - Die Diagramme zeigen links oben startend im Uhrzeigersinn: Body-Thermistor (T_{bo}), Dome-Thermistor Südost (T_{dSE}), Dome-Thermistor Südwest (T_{dSW}), Dome-Thermistor Nord (T_{dN}). Referenz sind jeweils die Messungen des Eppley PIR/UBT1 (Abszisse). Die Farben sind wie folgt zugeordnet: DWD - schwarz, TUD - dunkelgrau, UBAS - hellgrau (jeweils Ordinate). Alle Achsen sind in K skaliert.

Die in Abb. 9 zusammengestellten Diagramme bestätigen, dass die Probleme bei Messungen mit dem Eppley PIR mit der Erfassung der Body- und Dome-Temperaturen zusammenhängen. Die zur selben Zeit mit den unterschiedlichen Geräten erfassten Temperaturen zeigen Differenzen zum Referenzgerät von bis zu 4 K. Auffällig ist auch, dass alle Thermistoren eines Geräts dieselben Abweichungsmuster zeigen. Dies könnte auch in einer unterschiedlich starken Aufheizung der Sensoren begründet sein. Allerdings ist es eher unwahrscheinlich, dass dadurch so hohe Unterschiede entstehen. Um die Gründe für Unterschiede in den Thermistormessungen herauszufinden, sind Untersuchungen zur Kalibrierung der Thermistoren und zur Datenerfassung durch die einzelnen Gruppen angedacht.

4 Zusammenfassung

4.1 Pyranometer

Der Vergleich der Pyranometer ergibt, dass alle Geräte die Globalstrahlung gegenüber dem Referenzgerät unterschätzen. Steigungen und Achsenabschnitte der Best Fits liegen für die Typen CM21 und CM11 in denselben Größenbereichen. Unterschiede liegen in der Streuung vor: Hier weisen die Geräte vom Typ CM21 durchweg niedrigere Werte auf. Die Geräte vom Typ CM3 zeigen recht hohe Achsenabschnitte in den Best Fits.

Tab. 11 stellt die Parameter der Best Fits (bei Verwendung der beiden für das Referenzgerät möglichen Kalibrierfaktoren, siehe Kapitel 3.2) den Anforderungen an Strahlungsmessgeräte nach Kasten (1985) gegenüber. Diese geben an, welchen Wertebereich Steigung und Achsenabschnitt der Kalibrierung annehmen dürfen, damit das Gerät in die jeweilige Gerätekategorie eingeordnet werden kann. Für die Angabe des Wertebereichs, den die Steigung der jeweiligen Kalibrierung annehmen darf, wurden die zulässigen Fehler durch Nichtstabilität, Nichtlinearität und Abweichung vom Kosinus zusammengefasst. Vorausgesetzt ist, dass das Referenzgerät CM24(CM21)/DWD exakte Werte liefert.

In der Klasse "secondary standard" überschreiten die Geräte CM21/TUD, CM21/UBAS und CM14(CM11)/UBT1 (je nach verwendetem Kalibrierfaktor) die erlaubten Abweichungen für die Steigung. Bedenkt man aber, dass Referenz- und Vergleichsgeräte aus derselben Qualitätsklasse stammen, könnte es auch der Fall sein, dass das Referenzgerät am oberen Ende der erlaubten Abweichungen liegt, während die Geräte CM21/TUD, CM21/UBAS und CM14(CM11)/UBT1 um unteren Rand liegen. Insofern kann nicht eindeutig bewiesen werden, dass die genannten Geräte tatsächlich die an sie gestellten Qualitätsanforderungen verfehlen. Die Geräte der Klasse "second class" erfüllen alle die gestellten Qualitätsanforderungen.

Tab. 11: Vergleich der Koeffizienten des Pyranometervergleichs mit den Anforderungen an Strahlungsmessgeräte nach Kasten (1985). - Der jeweils obere Wert der Steigung ist gültig, wenn für das Referenzgerät der Kalibrierfaktor 12.09 verwendet wird; der untere Wert gilt für den Kalibrierfaktor 12.20. Grau eingetragen sind die Werte, die die maximal erlaubte Abweichung der jeweiligen Qualitätsklasse übersteigen.

Gerät	Steigung	Achsenabschnitt b
secondary standard	0.977 ... 1.023	-10 ... +10
ALUF1, CM21	0.987 0.977	-7.27
TUD, CM21	0.953 0.963	-5.44
UBAS, CM21	0.957 0.969	-1.95
IFT, CM11	0.978 0.988	+1.10
UBT1, CM14(CM11)	0.976 0.985	+4.58
second class	0.890 ... 1.110	-40 ... +40
TUBAF, CM3	0.927 0.937	+4.07
TUD, CNR1	0.915 0.924	+26.06
UBT1, CNR1	0.974 0.984	-20.04

4.2 Pyrgeometer

Die Geräte der Typen CG1 und CG3 weichen um höchstens 2.7 % vom Referenzgerät (Eppley/UBT1) ab, der Offset beträgt stets deutlich weniger als 15 W m^{-2} . Damit erfüllen die Geräte die allgemein an sie gestellten Qualitätsanforderungen.

Schwieriger gestaltet sich der Vergleich der Eppley PIR Pyrgeometer. Der Vergleich der nach Philipona et al. (1995) korrigierten Werte zeigt große Probleme in den Messungen. Aus diesem Grund wurden die Daten genauer unter die Lupe genommen: Sie wurden in den einzelnen Erfassungs- und Korrekturstadien verglichen, wobei verschiedene statisti-

sche Maßzahlen zum Einsatz kamen. In diesem Bericht wurden Werte für bias und comparability sowie Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen zum Referenzgerät gezeigt. Die Untersuchungen legen nahe, dass es beträchtliche Probleme mit der Temperaturmessung an und in den Geräten gibt. Darüber hinaus treten beim Gerät der Gruppe TUD schon in der langwelligen Strahlungsbilanz des Sensors erhebliche Unterschiede zum Referenzgerät auf.

Während eines Workshops wurden als mögliche Ursachen für die Unterschiede der Temperaturmessungen zum einen unterschiedliche Erfassungssysteme und zum anderen Schwierigkeiten mit den Kennlinien der Thermistoren diskutiert. Das Erfassungssystem während STINHO-1 unterschied sich zwischen den teilnehmenden Gruppen ganz erheblich, lediglich die Daten der Gruppen TUD und UBAS wurden mit demselben Logger und derselben Software aufgezeichnet und aufbereitet. Ein weiterer Schritt wäre nun, dass alle Gruppen ihr Datenerfassungssystem für das Eppley PIR eingehend auf Fehler prüfen. Dies ist für das System der Gruppen TUD und UBAS leider nicht mehr möglich, da der eingesetzte Logger dem Tharandter Hochwasser zum Opfer fiel. Weiter ist geplant, alle Eppley PIR Pyrgeometer vor der in 2003 stattfindenden EVA-GRIPS-Messkampagne parallel zu betreiben und dabei ein einziges Datenerfassungssystem zu benutzen. Was die Kennlinie der Thermistoren betrifft, wurden noch keine konkreten Schritte zu deren Überprüfung festgelegt. Wünschenswert wäre es aber, dass jede Gruppe die Kennlinie ihrer Thermistoren z. B. in einer Klimakammer überprüft.

5 Testmessungen mit dem Kipp & Zonen CG4

Während der Messkampagne STINHO2 (Sommer 2002) wurde ein weiterer Gerätevergleich langwelliger Strahlungsmessgeräte durchgeführt: Die Messergebnisse eines Kipp & Zonen CG4 für die langwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum wurden mit den Ergebnissen des Eppley-Geräts der Gruppe UBT1 verglichen.

Das Gerät CG4 verfügt regulär über nur einen Thermistor zur Erfassung der Body-Temperatur, Thermistoren zur Erfassung der Dome-Temperatur sind nicht vorgesehen. Allerdings soll eine zusätzliche Aufheizung des Domes und damit die Notwendigkeit einer Domekorrektur durch Form und Material des Domes vermieden werden. Für diesen Gerätevergleich wurde von der Firma Kipp&Zonen allerdings ein Gerät zur Verfügung gestellt, das über einen Dome-Thermistor verfügte. Die beiden Geräte wurden während eines fünftägigen Zeitraums parallel betrieben (05.07.02, 0:00 Uhr bis 10.07.02, 0:00 Uhr). Die Differenzen zwischen den Sensoren steigen in der Nacht (evtl. durch Tau- oder Regenfall) zum Teil stark an (Abb. 10). Deshalb wurden für die Regression der Geräte (Abb. 11) nur die Daten zwischen 7:30 Uhr UTC und 16:30 Uhr UTC verwendet.

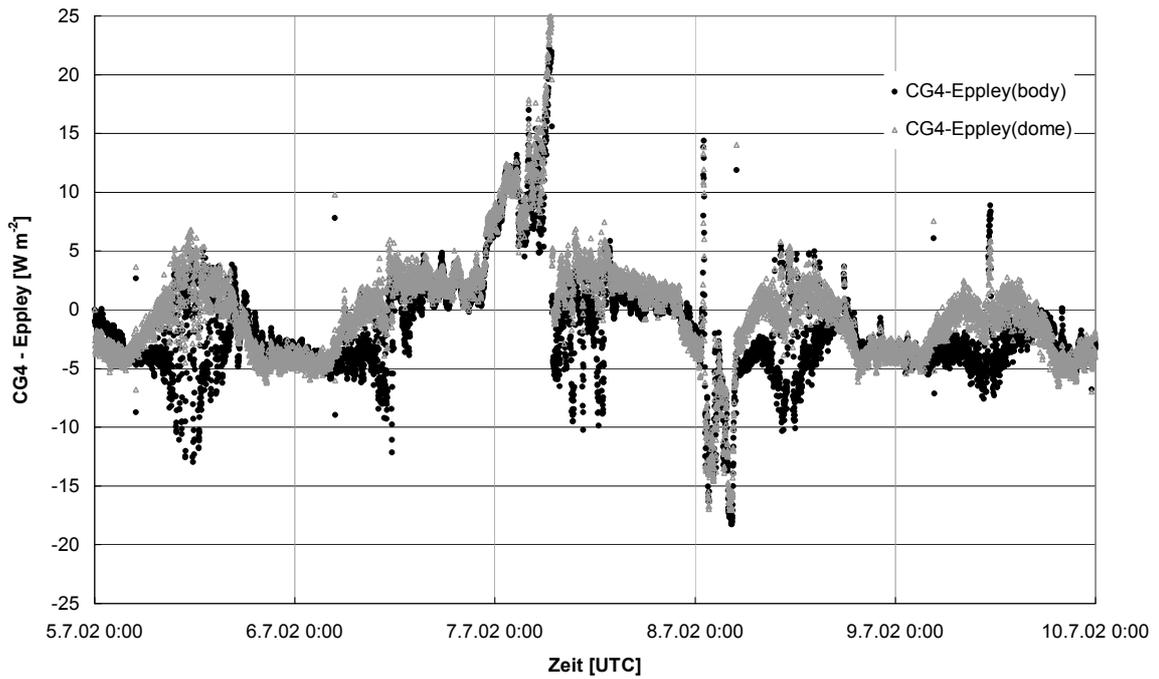


Abb. 10: Unterschiede zwischen den Geräten Kipp&Zonen CG4 und Eppley/UBT1. - Die schwarzen Kreise markieren die Unterschiede der CG4-Messungen zu den body-korrigierten Werten des Eppley/UBT1, die grauen Dreiecke die Unterschiede zu den body- und dome-korrigierten Werten des Eppley/UBT1.

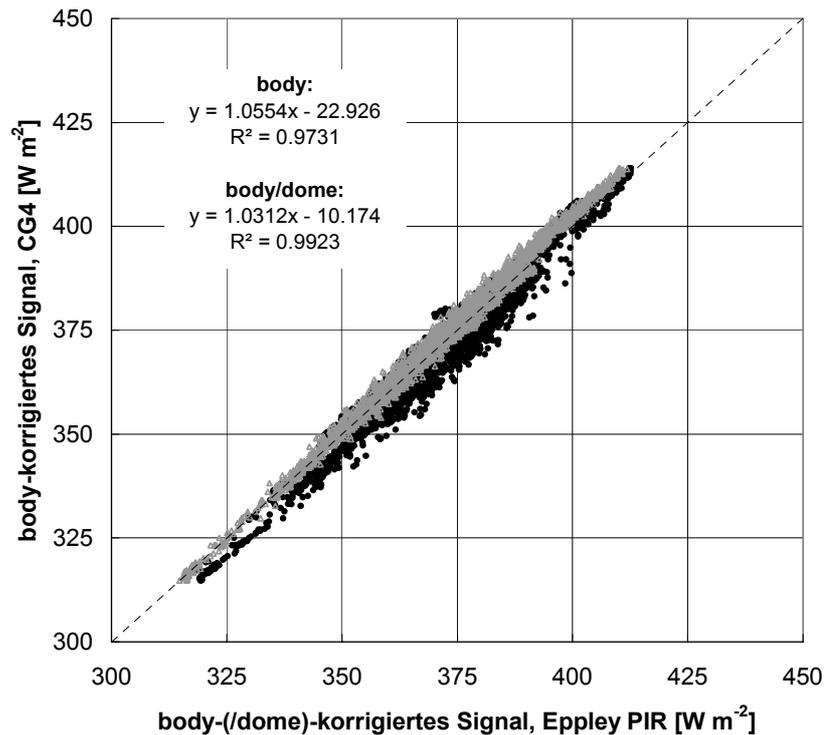


Abb. 11: Scatterplot der Geräte Kipp&Zonen CG4 und Eppley/UBT1. - Die schwarzen Kreise stellen den Plot CG4 (body-korrigiert) gegen Eppley (body-korrigiert) dar, die grauen Dreiecke den Plot CG4 (body-korrigiert) gegen Eppley (body- und dome-korrigiert) dar.

Die Übereinstimmung des CG4 mit den body- und dome-korrigierten Werten des Eppley PIR Pyrgeometers ist besser als die mit den nur body-korrigierten Werten. Dies zeigt neben den Scattplots (Abb. 11) auch ein Blick auf die Kennwerte bias und comparability: Der bias beträgt -2.10 (body-korrigiert) bzw. +1.45 (body- und dome-korrigiert); die comparability beläuft sich auf +3.99 (body-korrigiert) bzw. +2.34 (body- und dome-korrigiert). Da die in den Kapiteln 3 und 4 angesprochenen Probleme eventuell auch bei diesem Vergleich bestanden, können auch die obigen Ergebnisse nur als vorläufig gelten.

Dass unter Umständen Probleme mit den Kennlinien der Thermistoren im Kipp&Zonen CG4 bestehen könnten, zeigt ein Vergleich der Body- und der Dome-Temperatur des Geräts (Abb. 12): So ist es kaum erklärbar, warum sich Dome- und Body-Temperatur nachts wesentlich stärker unterscheiden als tagsüber. Aufgrund der Probleme in der Temperaturmessung ist auch nicht festzustellen, ob Form und Material des Domes eine Dome-Korrektur beim Gerät Kipp&Zonen CG4 tatsächlich überflüssig machen.

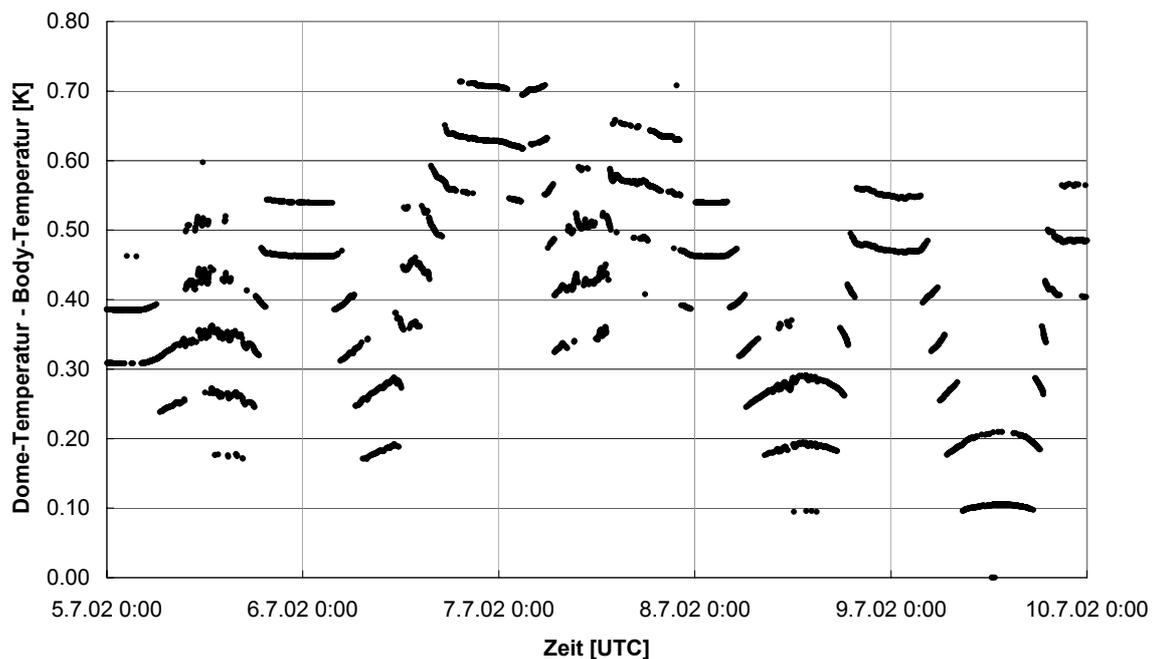


Abb. 12: Differenz zwischen der Dome- und der Body-Temperatur beim Gerät Kipp&Zonen CG4.

6 Ausblick und Danksagung

Festzuhalten bleibt letztendlich, dass im Bereich der Eppley PIR Pyrgometer bisher unbekannte Probleme aufgedeckt wurden, die im Interesse der Erfassung einer exakten Strahlungsbilanz möglichst rasch ausgeräumt werden müssen. Die Erfassung der kurzwelligen Strahlung scheint hingegen innerhalb der durch die Gerätequalität definierten Grenzen gut zu funktionieren. Dies ist allerdings auch nur dann der Fall, wenn die Sensoren mit größter Sorgfalt betrieben werden, wozu unter anderem exakte Positionierung und Ausrichtung, regelmäßige Reinigung und Wartung und einheitliche Datenbearbeitung gehören.

Danken möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich Herrn Dr. Beyrich, Herrn Prof. Dr. Foken und Herrn Dr. Weisensee, die mir durch Ihre Anregungen und Diskussionsbereitschaft bei der Erstellung dieses Berichts sehr weitergeholfen haben. Außerdem gilt ein besonderer Dank Herrn Jens Mayer, der einen großen Teil der für die Erstellung des Berichts nötigen Datenaufbereitung und -darstellung übernommen hat. Der Firma Kipp&Zonen danke ich für die Bereitstellung des Geräts CG4 für Testmessungen.

7 Quellen

Philipona, R., Fröhlich, C. und Betz, C., 1995. Characterization of pyrgometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. *Appl. Optics* 34: 1598-1605.

Kasten, F., 1985. Maintenance, calibration and comparison. Instruments and observ. methods, WMO Report No. 23, Genf: 65-84.

<http://www.afo2000-vertiko.de>

Bisherige Publikationen: `Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Arbeitsergebnisse`

Nr	Name	Titel	Datum
01	Foken	Der Bayreuther Turbulenzknecht	01/99
02	Foken	Methode zur Bestimmung der trockenen Deposition von Bor	02/99
03	Liu	Error analysis of the modified Bowen ratio method	02/99
04	Foken et al.	Nachtfrostgefährdung des ÖBG	03/99
05	Hierteis	Dokumentation des Experimentes Dlouha Louka	03/99
06	Mangold	Dokumentation des Experiments am Standort Weidenbrunnen, Juli/August 1998	07/99
07	Heinz, Handorf, Foken	Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis	07/99
08	Foken	Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99	10/99
09	Foken et al.	Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Zwischenbericht 1999	11/99
10	Sodemann	Stationsdatenbank zum BStMLU-Projekt Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	03/00
11	Neuner	Dokumentation zur Erstellung der meteorologischen Eingabedateien für das Modell BEKLIMA	10/00
12	Foken et al.	Dokumentation des Experimentes VOITEX-99	12/00

13	Bruckmeier et al.	Documentation of the experiment EBEX-2000, July 20 to August 24, 2000	01/01
14	Foken et al.	Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	02/01
15	Göckede	Die Verwendung des footprint-Modells nach SCHMID (1997) zur stabilitätsabhängigen Bestimmung der Rauigkeitslänge	03/01
16	Neuner	Berechnung der Evapotranspiration im ÖBG (Universität Bayreuth) mit dem SVAT-Modell BEKLIMA	05/01
17	Sodemann	Dokumentation der Software zur Bearbeitung der FINTUREX-Daten	08/02
18	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-1	08/02
19	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-2	12/02
20	Göckede et al.	Characterisation of a complex measuring site for flux measurements	12/02
21	Liebenthal	Strahlungsmessgerätevergleich während des Experimentes STINHO_1	01/03