



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

**MeteoSchweiz**

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 261

# Zirkumglobalstrahlungsmessungen mit Bellani Kugelpyranometer

Paolo Ambrosetti, Lorenzo Di Marco





**ISSN: 2296-0058**

**Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 261**

# Zirkumglobalstrahlungsmessungen mit Bellani Kugelpyranometer

Paolo Ambrosetti, Lorenzo Di Marco

**Empfohlene Zitierung:**

Ambrosetti, P.; Di Marco, L. : 2016, Zirkumglobalstrahlungsmessungen mit Bellani Kugelpyranometer, *Fachbericht MeteoSchweiz*, **261**, 65 pp.

**Herausgeber:**

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2016

**MeteoSchweiz**

Operation Center 1  
CH-8044 Zürich-Flughafen  
T +41 58 460 99 99  
[www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)



## Zusammenfassung

Das Bellani Kugelpyranometer ist ein altes Destillationsaktinometer und wurde 1836 von Angelo Bellani erstmals vorgestellt. Courvoisier & Wierzejewsky (1954) verbesserten und modernisierten es, und das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos hat über 700 Instrumente erstellt und verkauft.

Das Bellani Kugelpyranometer hatte bis in die 1970er Jahre eine weltweite Verbreitung, besonders in der Agrometeorologie, wurde dann aber entsprechend der Literatur kaum mehr erwähnt. Zur Zeit sind in der Schweiz nur noch zwei Bellani in Betrieb: In Locarno-Monti (im weiteren Textverlauf als „Locarno“ bezeichnet) und in Basel-Binningen, die immer am gleichen Ort messen.

In diesem Bericht wird zuerst das Instrument nach seinen Charakteristiken beschrieben. Das Bellani Kugelpyranometer liefert Tagessummen der auf eine Kugeloberfläche einfallenden Solarstrahlung, die als Zirkumglobalstrahlung bezeichnet wird. Diese ist natürlich von der Umgebung beeinflusst.

Für Locarno und Basel erstreckt sich die analysierte Datenreihe der Zirkumglobalstrahlungsmessungen vom 1.1.1960 bis 31.12.2015. Zur Analyse wurden Datensätze der folgenden Variablen verwendet und aufbereitet: Zirkumglobalstrahlung, horizontale Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, relative Sonnenscheindauer, Tagesmitteltemperatur, Schneehöhe am Morgen und am Abend gemessen.

Gewisse Analysen wurden mit zusätzlichen Daten erweitert, wie SACRaM direkte und diffuse Strahlung, die auf einem bodenlosen Würfel einfallende Strahlung, sowie die beobachtete Bewölkung. Die Datenreihe für Locarno wurde bereinigt und auf Homogenität geprüft. 68 zweifelhafte Tageswerte wurden mittels anderen Variablen interpoliert.

Die Analysen haben folgende wesentliche Ergebnissen gezeigt:

- Es wurde mittels Korrelationsanalyse und Parallelmessungen bestätigt, dass das in Locarno sowie in Basel benutzte Kugelpyranometer keine signifikante Änderung der Empfindlichkeit im Lauf der Zeit aufweisen.
- Das Bellani Kugelpyranometer zeigt eine leichte Abnahme der Empfindlichkeit bei grossen Werten in der Nähe der vollen Messskala.
- Die Bellani-Serie kann also für klimatologische Analysen des lokalen Strahlungsklimas benutzt werden.
- Für 2015 wurden gemessene Tagessummen der Zirkumglobalstrahlung mit berechneten Werten aus SACRaM Daten verglichen und eine gute Korrelation gefunden.

- Für Locarno wurden Bellani Tageswerte mit der Summe der Globalstrahlung auf die Horizontale und die 4 vertikalen Flächen während 1960-71 analysiert und eine erstaunlich gute Übereinstimmung gefunden.
- Der Vergleich über Jahrzehnte mit Anomalien anderer Variablen (horizontale Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Bewölkung) zeigte i.A. eine gute Korrelation, insbesondere in den letzten 25 Jahren.
- Klimatologisch betrachtet, konnte man feststellen, dass ab etwa 2001 bis etwa 2008 eine rasche Zunahme der Strahlung beobachtet wurde, danach fand eine Stabilisierung mit höheren Werten statt. Entsprechend der Verteilung der Daten ist eine mögliche Erklärung die höhere Häufigkeit von sonnigen Tagen. Ähnliche Feststellungen wurden auch in aktuellen Publikationen gefunden.
- Eine weitere Analyse wurde gemacht, um die Auswirkung des am Boden liegenden Schnees auf die Zirkumglobalstrahlung abzuschätzen. In Davos konnte klar eine stärkere Reflexstrahlung im Hochwinter als im Frühjahr bei Altschnee festgestellt werden. Für einzelne Tage in Locarno verstärkte sich die Albedo mit Schnee um 0.5-0.6.

**Diese weltweit längsten Messreihen der Zirkumglobalstrahlung mit dem Bellani Kugelpyrometer in Locarno und Basel-Binningen werden fortgesetzt. Der vorliegende Bericht zeigt den Mehrwert und den Nutzen dieser Beobachtungen auf.**

## Abstract

The Bellani spherical pyranometer is an old distillation actinometer first described by Angelo Bellani in 1836. Courvoisier & Wierzejewsky (1954) improved and modernized it by introducing several improvements; the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos produced and sold more than 700 instruments.

This spherical pyranometer had a worldwide diffusion until the 1970s, particularly in agrometeorology, but later it almost disappeared from scientific literature. Presently, only two instruments are still operational in Switzerland, namely in Locarno-Monti and Basel-Binningen, where they always measure at the same place.

In this report we first describe the instrument and its characteristics. The Bellani pyranometer measures the daily sum of the incoming solar radiation on a spherical receiver, called circumglobal radiation. Of course, this is influenced by the surroundings. The considered data series of the circumglobal radiation in Locarno and in Basel extends from 1.1.1960 to 31.12.2015. In the analysis the following variables were used: circumglobal radiation, horizontal global radiation, absolute sunshine duration, relative sunshine duration, daily mean air temperature, snow height on the ground in the morning and evening.

For special analysis, additional variables were considered: direct and diffuse solar radiation from SACRaM network, sum of global radiation on the 5 faces of a bottomless cube and observed cloudiness. The data series in Locarno were checked and homogenised: 68 suspicious daily values were interpolated using ancillary data.

The analysis showed the following significant results:

- Correlation analysis and parallel measurements confirmed that the spherical pyranometers used in Locarno and Basel didn't show any significant changes in the sensitivity during their lifetime.
- The Bellani spherical pyranometer shows a light sensitivity reduction concerning the values in proximity to the measurement scale's top.
- The Bellani data series can therefore be used for studies of the local radiation climate.
- For 2015 we found a good correlation between the measured daily circumglobal radiation and the computed values using SACRaM data in Locarno.
- For Locarno, Bellani daily data were compared to the sum of global radiation on the horizontal and 4 vertical surfaces during 1960-71 and a surprisingly good match was found.

- The comparison of the yearly anomalies over several decades of the circumglobal radiation and other variables (horizontal global radiation, sunshine duration and cloudiness) showed a generally good agreement, particularly in the last 25 years.
- From the climatological point of view, between 2001 and 2008 we found a rapid increase of the observed solar radiation and a following stabilization on values higher than the previous ones. Considering the frequency distributions, a possible explanation could be a higher number of sunny days. Similar findings have also been found in recent publications.
- We analysed as well the effect on the circumglobal radiation by the snow on ground. In Davos we observed a higher albedo by new snow in midwinter than old snow in springtime. For Locarno the analysis of single days displayed an albedo value of 0.5-0.6.

**The worldwide longest measurements series of the circumglobal radiation by Bellani spherical pyranometer in Locarno-Monti and Basel-Binningen continue. The present report shows the value add and the benefit of these observations.**



## Riassunto

Il piranometro sferico Bellani è un attinometro a distillazione presentato la prima volta nel 1836 da Angelo Bellani. Courvoisier & Wierzejewsky (1954) l'hanno modificato e modernizzato e l'Osservatorio Fisico-Meteorologico di Davos ne ha prodotti e venduti più di 700 esemplari. Il piranometro Bellani ha avuto fino agli anni '70 una vasta diffusione a livello mondiale, in particolar modo nell'ambito dell' agrometeorologia. In seguito, però, è praticamente scomparso dalla letteratura scientifica. Attualmente in Svizzera sono in funzione ancora solo due strumenti: a Locarno-Monti e a Basilea Binningen, dove proseguono le misure esattamente allo stesso posto.

In questo rapporto vengono dapprima descritte le caratteristiche dello strumento. Il piranometro Bellani misura la somma giornaliera della radiazione solare incidente su una sfera, denominata così radiazione circumglobale. Questa viene influenzata anche dall'ambiente circostante. Per Locarno e Basilea la serie di dati analizzata della radiazione circumglobale si estende dal 1.1.1960 al 31.12.2015.

In questo lavoro sono state considerate anche la radiazione globale su una superficie orizzontale, la durata del soleggiamento, la temperatura media giornaliera, la neve al suolo osservata il mattino e la sera. Alcune analisi sono state completate per Locarno con la radiazione solare diretta e diffusa della rete SACRaM, la radiazione incidente sulle facce di un cubo senza base, come pure la nuvolosità osservata. La serie di Locarno-Monti è stata controllata e omogeneizzata: 68 valori giornalieri sospetti sono stati interpolati con l'ausilio delle altre variabili.

Le analisi hanno portato questi risultati principali:

- Le analisi di correlazione e delle misure in parallelo hanno confermato che gli strumenti utilizzati a Locarno e Basilea non hanno mostrato nessuna variazione significativa della loro sensibilità sull'arco del lungo periodo di misura.
- Il piranometro sferico Bellani mostra un leggero calo della sensibilità per i valori in prossimità del limite superiore della scala di misura.
- La serie Bellani può quindi essere utilizzata per analisi climatologiche del clima radiativo locale.
- Il confronto per il 2015 della radiazione circumglobale e i dati SACRaM a Locarno ha mostrato una buona correlazione.
- Per gli anni 1960-71 a Locarno sono state confrontate le misure della radiazione circumglobale e quelle della somma della radiazione incidente sulle facce di un cubo senza base: l'accordo è stato eccezionalmente buono.

- Il confronto sull'arco di decenni dell'evoluzione delle anomalie con altre variabili (radiazione globale orizzontale, durata del soleggiamento e nuvolosità) mostrano in generale una buona correlazione, soprattutto negli ultimi 25 anni.
- Dal punto di vista climatologico si è potuto constatare che tra il 2001 e il 2008 c'è stato un rapido aumento della radiazione e in seguito una stabilizzazione su valori più elevati che in precedenza. In base alla distribuzione delle frequenze si può spiegare questo fatto in parte con una maggior frequenza di giorni soleggiati. Una simile conclusione si è trovata in recenti pubblicazioni.
- L'effetto della presenza della neve al suolo sulla radiazione circumglobale è stato pure analizzato. Per Davos si è vista una maggior radiazione riflessa in pieno inverno rispetto alla primavera con per lo più neve vecchia. Un'analisi per singole giornate a Locarno ha permesso una stima dell'albedo in presenza di neve al suolo di 0.5-0.6.

**Le serie di osservazioni più lunghe al mondo della radiazione circumglobale con il piranometro Bellani a Locarno-Monti e Basilea viene proseguita. Il presente rapporto mostra il valore e l'utilità di queste osservazioni.**

## Résumé

Le pyranomètre sphérique Bellani est un ancien actinomètre à distillation qui a été cité pour la première fois en 1836 par Angelo Bellani. Courvoisier & Wierzejewsky (1954) l'ont amélioré et modernisé; depuis, l'Observatoire physico-météorologique de Davos en a produit et vendu plus de 700. Jusqu'aux années 70 le pyranomètre sphérique Bellani a été l'objet d'une diffusion mondiale, particulièrement dans le domaine de l'agro-météorologie, mais depuis il a presque disparu dans la littérature scientifique. En Suisse il ne reste à ce jour plus que deux instruments en fonction: ils mesurent depuis le début au même endroit, à Locarno-Monti et à Bâle-Binningen.

La première partie de ce rapport décrit les caractéristiques de cet instrument. Le pyranomètre sphérique Bellani fournit les sommes journalières du rayonnement solaire atteignant la surface d'une sphère, paramètre défini comme la radiance sphérique. Celle-ci est naturellement influencé par l'environnement.

Pour Bâle et Locarno, les séries temporelles de la radiance sphérique ont été établies pour la période du 1.1.1960 au 31.12.2015. Les analyses effectuées ont considéré les variables suivantes: la radiance sphérique, le rayonnement global horizontal, la durée d'ensoleillement, la durée d'ensoleillement relative, la température journalière moyenne, ainsi que la hauteur de neige mesurée le matin et le soir.

Certaines analyses ont par la suite été étayées grâce à des comparaisons avec des mesures de rayonnement direct et diffus du réseau SACRaM, avec des mesures incidentes sur un «cube sans base», ainsi qu'avec la couverture nuageuse observée. La série temporelle de Locarno a été filtrée et son homogénéité confirmée. Ce sont 68 valeurs douteuses qui ont ainsi été interpolées à partir d'autres variables.

Les analyses ont notamment fourni les résultats ci-dessous :

- Grâce à des analyses de corrélation et des mesures parallèles, il a été montré qu'à Locarno et à Bâle aucun changement significatif dans la sensibilité des instruments n'a été observé au fil du temps.
- Le pyranomètre sphérique Bellani montre une légère diminution de sa sensibilité à des valeurs élevées, au voisinage de la pleine échelle de mesure.
- La série de mesures Bellani peut parfaitement être utilisée pour des analyses climatologiques du rayonnement local.

- Pour 2015, les sommes journalières Bellani de radiance sphérique ont montré une bonne corrélation avec celles calculées à partir des mesures par le réseau SACRaM.
- A Locarno, les valeurs journalières du pyranomètre sphérique Bellani ont été comparées avec celles du rayonnement global sur une surface horizontale ainsi que sur les 4 surfaces verticales pendant les années 1960-71. Elles ont montré un accord étonnamment bon.
- Au fil des décennies, la comparaison avec des anomalies d'autres variables (rayonnement global horizontal, durée d'ensoleillement, nébulosité) a montré, en général, une bonne corrélation, particulièrement pendant les derniers 25 ans.
- Du point de vue climatologique, de 2001 à environ 2008, une augmentation rapide du rayonnement a été observée, suivie d'une stabilisation. En se basant sur la distribution statistique des données, une explication possible est une augmentation de la fréquence des journées ensoleillées. Des publications récentes font référence à des conclusions similaires.
- Des analyses sur l'impact de la couverture neigeuse sur la radiance sphérique ont également été effectuées. A Davos, un rayonnement réfléchi plus important en plein hiver qu'au printemps a ainsi pu être démontré. A Locarno, pour les jours avec neige, l'albédo peut augmenter pour atteindre des valeurs de 0.5 à 0.6.

**Les séries temporelles les plus longues au monde des mesures de radiance sphérique par pyranomètre sphérique Bellani à Locarno et à Bâle vont être poursuivies. Le présent rapport montre la valeur et les bénéfices de ces observations.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Riassunto</b>	<b>IX</b>
<b>Résumé</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer</b>	<b>3</b>
2.1 Zirkumglobalstrahlung und Horizontalgobalstrahlung	3
2.2 Das Bellani Kugelpyranometer (PBK)	5
2.2.1 Entwicklung des Instrumentes	5
2.2.2 Aufbau und Handhabung	6
2.2.3 Funktionsweise des Instrumentes	8
2.2.4 Störeffekte und auftretende Fehler	10
2.2.5 Reproduzierbarkeit der Messungen	12
<b>3 Datenreihen</b>	<b>15</b>
3.1 Standorte	15
3.2 Benutzte Daten	16
3.2.1 Beschreibung der Variablen	17
3.2.2 Kalibrierungsfaktoren und Einheiten	18
3.2.3 Datenverfügbarkeit und Messinstrumente	19
3.3 Datenbereinigung	20
3.3.1 Identifizierung der Ausreisser in Locarno	20
3.3.2 Reproduzierbarkeit der Messungen	22
3.4 Aktueller Datenbestand in der MeteoSchweiz DWH	22
<b>4 Datenanalyse</b>	<b>23</b>
4.1 Homogenität der Zirkumglobalstrahlungs-Messreihen	23
4.2 Erkennung von klimatologischen Trends	25
4.2.1 Vergleich zwischen LOM und BAS Zirkumglobalstrahlung	27
4.3 Vergleich mit anderen Strahlungsmessreihen	34
4.3.1 SACRaM direkte und diffuse Strahlung	34
4.3.2 Zirkumglobalstrahlung und diejenige auf einen Würfel ohne Grundfläche	36
4.3.3 Beobachtete Bewölkung (SYNOP)	38
4.4 Schneeeauswirkung auf die Zirkumglobalstrahlung	39
4.4.1 Schneeeffekt in Davos	39

4.4.2	Schneeeauswirkung in Locarno-Monti	41
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen</b>	<b>43</b>
	<b>Abkürzungen</b>	<b>47</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>48</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>50</b>
	<b>Anhang</b>	<b>51</b>

# 1 Einleitung

Die einfallende Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche ist eine der wesentlichen Variablen des Klimas. Langjährige zuverlässige und genaue Messreihen sind aber eher selten. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer Zusammenstellung der Zirkumglobalstrahlungsmessungen an zwei verschiedenen schweizerischen Messstandorten: Locarno (TI) und Basel-Binningen (BL). Weitere Messstationen Zürich (ZH) und Davos (GR) verfügen über kürzere Datenreihen. Die Messungen wurden mittels eines Kugelpyranometers nach Bellani erfasst. Die Zeitreihe erstreckt sich vom 1. Januar 1954 bis 31. Dezember 2015.

In einem ersten Theorieteil wird die Funktionsweise und Benutzung des Bellani Kugelpyranometers erläutert.

Der zweite Teil befasst sich mit der Analyse der Zirkumglobalstrahlung: Homogenisierung der Datenreihen, Vergleich mit der horizontalen Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer, um a) allfällige klimatische Trends zu identifizieren, b) mit anderen Strahlungsdaten zu vergleichen und c) den Schneeeffekt auf die Messungen zu untersuchen. Sämtliche Daten liegen jetzt im DWH von MeteoSchweiz zur Verfügung.

Im Jahr 2007 wurden die von MeteoSchweiz benutzten Messinstrumente für die horizontale Globalstrahlung durch die Einführung des SwissMetNet gewechselt. Eine bereinigte Bellani Zeitreihe könnte als Vergleichsmittel für die Globalstrahlungsmessungen benutzt werden.





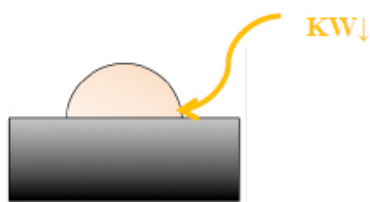
## 2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer

## 2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer

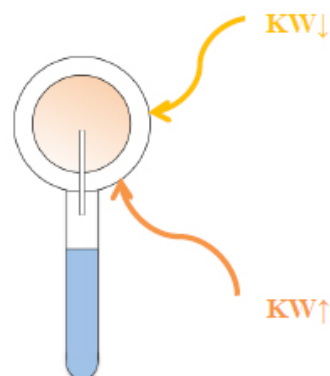
### 2.1 Zirkumglobalstrahlung und Horizontalglobalstrahlung

Die Zirkumglobalstrahlung ist als die auf eine Kugeloberfläche auffallende Strahlung definiert (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954). Wie unterscheidet sich also die Zirkumglobal- von der horizontal gemessenen Globalstrahlung? Folgende Tabelle fasst die Hauptunterschiede zusammen:

Horizontale Globalstrahlung	Zirkumglobalstrahlung
<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Auf eine horizontale Fläche auffallende Strahlung</li> <li>→ Aus dem oberen Halbraum</li> <li>→ Direkte Strahlung vom Sinus des Einfallswinkels abhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Auf eine Kugelfläche auffallende Strahlung</li> <li>→ Aus dem ganzen oberen und unteren Halbraum</li> <li>→ Direkte Strahlung unabhängig vom Einfallswinkel</li> </ul>



Links: Schematische Darstellung der Messung der horizontalen Globalstrahlung.



Rechts: Schematische Darstellung der Messung der Zirkumglobalstrahlung.

Schüepf (1960) beschrieb das Bellani Kugelpyranometer damals als ein empfindliches Messinstrument mit verschiedenen Vorteilen in Bezug auf andere elektronische Strahlungsmessgeräte. Als einzigen Nachteil erkannte er, dass die Umrechnung der Zirkumglobalstrahlung zur horizontalen Globalstrahlung schwierig ist. Deshalb befasste er sich mit der Konversion von ZGS in HGS Werte. Schüepf (1960) schaffte eine Konversionsformel von ZGS zu HGS, die nur die Albedo und die geometrischen Parameter Sonnendeklination  $\delta$  und geographische Breite  $\varphi$  als Variabel enthält. In der Entwicklung der Konversionsformel wurden zudem folgende Punkte berücksichtigt: Extinktion der Strahlung in der Atmosphäre, Bewölkungsgrad, sowie der Einfluss des direkten und diffusen Lichts. Für tiefe Breiten ( $\varphi < 30^\circ$ ) ist es möglich, eine Beziehung zweiten oder dritten Grades zwischen den Tagessummen von ZGS und HGS abzuleiten, die nur von der Differenz zwischen geographischer Breite  $\varphi$  und Sonnendeklination  $\delta$  und von der Albedo  $\alpha$  abhängig ist. In höheren Breiten gilt die Formel nur im Sommerhalbjahr (Schüepf, 1960).

Der Hauptunterschied zwischen horizontaler und zirkumglobaler Messung der Globalstrahlung ist für die horizontale Globalstrahlung die Abhängigkeit vom Strahlungseinfallswinkel, da die Intensität der direkten Komponente mit abnehmendem Sinus des Strahlungseinfallswinkels auch abnimmt. Bei der horizontalen Messung der Globalstrahlung in den mittleren Breiten, wie in der Schweiz, gibt es dementsprechend eine verstärkte Saisonalität im Vergleich zu tropischen Breiten, da die Schwingung des Sonnenstandes auch grösser ist.

Ein weiterer Unterschied ist, dass eine Messung der zirkumglobalen Globalstrahlung nicht nur, wie eine horizontale Messung, direkte und diffuse Strahlung misst, sondern auch der von der Bodenoberfläche reflektierte Anteil der Globalstrahlung. Änderungen der Albedo spielen also eine Rolle (insbesondere Schnee am Boden).

Das Bellani misst die Zirkumglobalstrahlung, also die aus dem vollen  $4\pi$  Raum eintreffende Strahlung. Dadurch ist das Instrument heute kaum noch mit anderen Instrumenten vergleichbar (DEFANT, F. ET AL., 1973).

Bioklimatisch gesehen, ist die Zirkumglobalstrahlung eine gute Messung, um die von einem Baum absorbierte Strahlungsenergie modellieren zu können. Im Vergleich zur horizontalen Globalstrahlung ist die Zirkumglobalstrahlung in diesem Fall ein vorteilhaftes Vergleichsmittel. Aus diesem Grund wurde dieses Instrument eher in der Agrometeorologie eingesetzt und wahrscheinlich sind deswegen kaum lange Messreihen vorhanden.

Diese Strahlungsdaten können grob auch für die Abschätzung der einfallenden Einstrahlung auf ein Gebäude verwendet werden, das durch einen Kugel simuliert wird. Wir zeigen in diesem Bericht einen Vergleich zwischen Kugelpyranometer und die auf einen bodenlosen Würfel fallende Strahlung (Summe von 5 Flächen).

## 2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer

## 2.2 Das Bellani Kugelpyranometer (PBK)

In diesem Kapitel wird das Bellani Kugelpyranometer (PBK), seine Entwicklung sowie seine Funktionsweise dargestellt. Mittels Beschreibung der thermodynamischen Vorgänge im Instrument kann eine Kalibrierungsformel hergeleitet werden.

## 2.2.1 Entwicklung des Instrumentes

Das PBK ist, nach unserer Kenntnis, eines der ältesten nicht elektronischen Strahlungsmessinstrumente, welches noch heute in Gebrauch ist. Sein Erfinder war der italienische Physiker und Kanonikus Angelo Bellani (1776 - 1852), der im Jahr 1836 in der wissenschaftlichen Zeitschrift „*Annali delle Scienze del Regno Lombardo-Veneto*“ sein Instrument erstmals beschrieb. Das Bellani-Instrument wurde im Laufe der Zeit von verschiedenen Wissenschaftlern bis zu seinem heutigen Stand weiterentwickelt und verbessert, was heute als Kugelpyranometer nach Bellani bezeichnet (PBK) wird.

**ANNALI  
DELLE SCIENZE**  
DEL  
REGNO LOMBARDO-VENETO  
*Opera Periodica*  
DI ALCUNI COLLABORATORI

T. VI.

ANNO M. DCCC. XXXVI.

NOMI DEI SIGNORI COLLABORATORI PER L'ANNO SUDEDETTO  
POSTI SECONDO L' ORDINE ALFABETICO

BELLANI ANGELO, Mons. Canonico, Fisico in Milano.  
 BELLAVITIS GIUSTO, Matematico in Bassano.  
 BELLI Dott. GIUSEPPE, Prof. di Fisica nell' I. R. Liceo di Milano.  
 BIZIO Dott. BARTOLOMEO, Chimico in Venezia.  
 BUSSOLIN PIETRO, Capo-Assaggiatore nell' I. R. Zecca di Venezia.  
 CONTI Dott. CARLO, Aggiunto Astronomo all' I. R. Osservatorio di Padova, e Prof. Suppl. alla Cattedra di Calcolo Sublime.  
 DAL-NEGRO Dott. Ab. SALVATORE, Prof. di Fisica nell' I. R. Università di Padova.  
 DA-RIO Nob. NICOLO, Naturalista e Dir. della Facoltà Filosof. nella stessa I. R. Università.  
 FABRONI Dott. ANTONIO, Chimico in Arezzo, e Segretario dell' Accademia Arcadia.  
 FUSINIERI Dott. AMBROGIO, Fisico in Vicenza.  
 GENÈ Dott. GIUSEPPE, Prof. nella R. Università di Torino.  
 GIULI Dott. GIUSEPPE, Prof. in Siena.  
 MAGRINI Dott. LUIGI, Assistente alla Cattedra di Fisica nell' I. R. Università di Padova.  
 MALACARNE Dott. CLAUDIO GIUSEPPE di Milano, I. R. Consigliere Montanario.  
 MARLANINI Dott. STEFANO, Prof. di Fisica nell' I. R. Liceo di Venezia.  
 MATTEGGI CARLO, Fisico e Chimico in Forlì.  
 MINICH Dott. SERAFINO RAFFAELE, Prof. Suppl. alla Cattedra d' Introduzione al Calcolo Sublime nella I. R. Università di Padova.  
 MONTESANTO Dott. GIUSEPPE, Medico in Padova.  
 NAMIAS Dott. GIACINTO, Medico in Venezia.  
 PARESI LODOVICO, Naturalista di Sclavo.  
 SANTINI Dott. GIOVANNI, Prof. di Astronomia nell' I. R. Università di Padova.  
 ZAMBONI GIUSEPPE, Prof. di Fisica nell' I. R. Liceo di Verona.  
 ZANENI Dott. PAOLO, Medico Primario nello Spedale Civile di Venezia.  
 ZANTDESCHI Prof. Ab. FRANCESCO, Fisico in Verona.  
 ZECCHINELLI GIO. MARIA, Medico in Padova, e Regio Ispettore alle Terme di Abano.

PADOVA  
COI TIPI DEL SEMINARIO  
1836

104.747 C.

Abbildung 1: Erste Seite der Wissenschaftlichen Zeitschrift *Annali delle Scienze del Regno Lombardo-Veneto* (Bellani, 1836)

Die letzte und auch am besten dokumentierte Entwicklung des Instrumentes wurde 1954 im Physikalisch-Meteorologische Observatorium in Davos angefertigt (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954). Das Bellani-Instrument wurde wesentlich verbessert, so dass der Fehler der Tagessummen der eingestrahnten Energie kleiner als 3% ist (Schram & Thams, 1967).

Laut Wierzejewsky (1962) wurden in den ersten 10 Jahren über 700 Instrumente dieses Modelles erstellt und in die ganze Welt verteilt, natürlich auch an das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Die meisten Geräte wurden in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt, weil sie einfach die Strahlungsumgebung integrieren konnten. Neben dem Davoser Modell gab es auch andere Hersteller und Modelle (z.B. Gunn). Leider konnte keine ausführliche Beschreibung darüber gefunden werden. Im Allgemeinen stammt die meiste, darüber auffindbare Literatur über den Einsatz des Bellani-Kugelpyranometers aus den 50er und 60er Jahren. Wahrscheinlich wurden sie später nur in Afrika und Zentralamerika in der Agrometeorologie noch gebraucht. Nach unseren Untersuchungen sind die PBK, die noch im Betrieb sind, ebenso die Davoser Modelle und befinden sich in Locarno (TI) und in Basel-Binningen (BL).

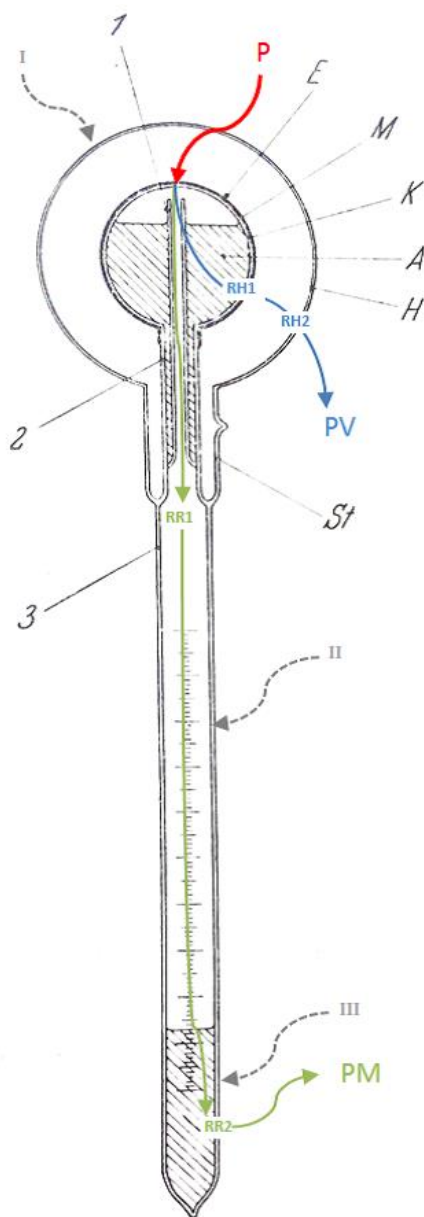
### 2.2.2 Aufbau und Handhabung

Eine sehr umfassende und ausführliche Beschreibung des Instrumentes wurde von Courvoisier & Wierzejewsky (1954) veröffentlicht.

Das Messprinzip des Bellani-PBK ist leicht verständlich: die auf eine Empfängerfläche einfallende Solarstrahlung fördert das Verdunsten einer Flüssigkeit, die folglich kondensiert und sich in einem Messrohr sammelt. Alkohol dient als Verdunstungsflüssigkeit. Was vom Instrument indirekt gemessen wird, ist die über eine bestimmte Zeitspanne integrierte Summe der eingefallenen Zirkumglobalstrahlung. Diese wird dann als verdunstete Zentimeter Flüssigkeit ausgedrückt. Die Anwendung einer Kalibrierungsformel erlaubt die Umwandlung der Ablesungswerte in eine Strahlungseinheit. Die Herleitung der Kalibrierungsformel wird im nächsten Kapitel erwähnt.

## 2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer

Der Aufbau des PBK ist in Abbildung 2 dargestellt. Man erkennt die Innere Kugel *K* mit ihrem Metallmantel *M*, dessen Oberfläche *E* als Empfängerfläche für die einfallende Strahlung dient. Die Empfängerfläche *E* ist von der Hüllkugel *H* umgeben. Der Raum zwischen den beiden Kugeln ist evakuiert, um Wärmeaustausch von den inneren gegen die Hüllkugel so stark wie möglich zu reduzieren. An der Stelle *St* wird das Instrument mit einer Stativklammer gehalten. Das *Rohr 2* verbindet den Hals der Hüllkugel mit dem *Kondensationsrohr 3*. Das *Glasröhrchen 1*, das sich im *Rohr 2* befindet, verhindert den Rückfluss des Alkohols von der Hüllkugel ins *Messrohr 3*, so dass Alkohol nur nach Verdampfung dort übertreten kann.



**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau des Bellani Kugelpyranometers (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954)

Die Handhabung des Instruments ist ziemlich einfach. Am Morgen<sup>1</sup> muss der Beobachter die Höhe der Alkoholsäule ablesen, danach muss er den Bellani-PBK wieder messbereit setzen. Nach der Ablesung findet die sog. *Nullage* statt. Man hält das Instrument senkrecht mit der Hülle nach unten gerichtet, damit der Alkohol vom Messrohr wieder in die innere Kugel *K* einfließt. Dann bringt der Beobachter die Hüllkugel wieder nach oben. Nach dieser Operation ist das Bellani-PBK wieder messbereit. Nach der Drehung wird sich das Alkoholniveau sehr wahrscheinlich nicht mehr am Nullpunkt der Messskala befinden. Das Alkoholniveau kann nach der *Nullage* noch leicht ansteigen, da restlicher Alkohol noch am Glasröhrchen ankleben kann. Der Beobachter sollte also geduldig sein und den Nullpunkt der Messskala erst nach ein paar Minuten abschreiben.

### 2.2.3 Funktionsweise des Instrumentes

Das Bellani Instrument ist ein mit Destillation arbeitendes Messinstrument. Es wird also anstatt einer Temperaturdifferenz ein Wärmestrom gemessen. Andere Aktinometer messen hingegen die durch die Strahlung hervorgerufene Übertemperatur der Empfängerfläche und rechnen in die entsprechende Strahlungsflussdichte um. Der Hauptvorteil des PBK ist also, dass es keinen Strom braucht, um operationell zu sein.

Die von Courvoisier und Wierzejewsky beschriebene Analogie zwischen Wärmeströmungen und elektrischen Strömungen in einfachen Schaltungen hilft zum Verständnis der Wärmeströmungsvorgänge im Instrument und trägt zum Verständnis der Funktionsweise des Instrumentes bei.

---

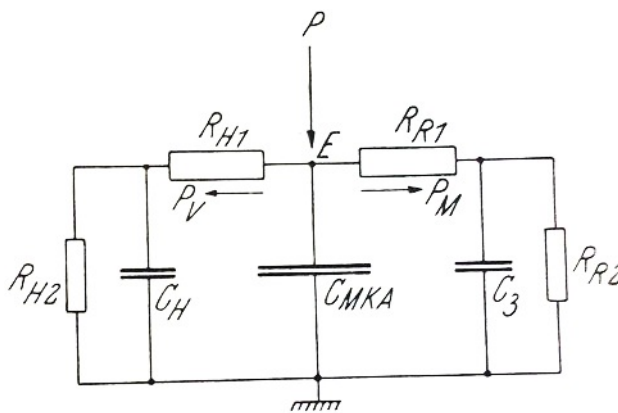
<sup>1</sup> In der Vergangenheit fand die Ablesung früh am Morgen statt. Heutzutage findet sie am Abend statt.

Hier eine vereinfachte Zusammenfassung:

Abbildung 3 stellt diese vergleichbare elektrische Schaltung dar.

Dabei entspricht:

1. Kapazität eines Kondensators: Wärmekapazität eines Bauteiles des Instruments
2. Ohmscher Widerstand: Thermischer Widerstand im Instrument
3. Elektrischer Strom: Wärmestrom



**Abbildung 3:** Die vergleichbare elektrische Schaltung (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954)

$C_{MKA}$  bedeutet die Wärmekapazität der ganzen Empfängerkugel  $E$  des PBK, also die Summe der Wärmekapazitäten der Glaskugel  $K$ , Metallmantel  $M$  und Alkoholfüllung  $A$ . Wir nehmen an, dass das Instrument sich in einem stationären Betriebszustand befindet, d.h. durch die genügend dauernde Bestrahlung haben alle Instrumententeile eine konstante Temperatur, so dass die Speicherkapazitäten keine Wärme- bzw. elektrische Strömung auf- oder abgeben. Zudem nehmen wir die auf das Instrument fallende Strahlung als konstant an (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954). Die Ströme, Kapazitäten und Widerstände sind in der Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Die Strahlung, welche auf die Empfängerfläche  $E$  fällt, bewirkt den Wärmestrom  $P$ . Die Strahlung fällt auch auf die Hüllkugel  $H$ , auf das Rohr 3 sowie in den schon überdestillierten Alkohol, d.h. es entstehen auch dort Wärmeströme. Diese sind aber zu klein im Vergleich zu  $P$  und können vernachlässigt werden. Der Wärmestrom  $P$  fließt durch das Instrument hindurch und zuletzt an dessen Umgebung. Er muss während des Fließens verschiedene Widerstände überwinden. Die Kondensatoren  $C_H$  und  $C_3$  entsprechen der Wärmekapazität der Hüllkugel  $H$  und der freien Rohrwand des Kondensationsrohres 3. Der schon im Rohr kondensierte und gesammelte Alkohol kann auch vernachlässigt werden, da er ausserhalb des messbaren Betrages ist.

Der eintretende Strom  $P$  wird nun in 2 verschiedene Teilströme geteilt. Diese sind:

1.  $P_V$  (Verlustströmung): fliesst von der Empfängerkugel  $E$  über den Widerstand  $R_{H1}$  in die Hüllkugel und von dort fliesst er über den Widerstand  $R_{H2}$  in die Umgebung ab.
2.  $P_M$  (Messungsströmung): fliesst von der Empfängerkugel über den Widerstand  $R_{R1}$  in das Kondensationsrohr und dann über den Widerstand  $R_{R2}$  in die Umgebung. Diese Strömung trägt zur Messung bei.

Die Ströme  $P_M$  bzw.  $P_V$  fliessen dann nicht nur in  $R_{R1}$  bzw.  $R_{H1}$ , sondern in gleicher Stärke auch in  $R_{R2}$  bzw.  $R_{H2}$ , und man kann für diesen stationären Zustand die Teilwiderstände durch

$$R_R = R_{R1} + R_{R2} \quad R_H = R_{H1} + R_{H2} \quad (1)$$

zusammenfassen und so die Schaltung noch einmal vereinfachen.

Der Wärmestrom  $P_M$  wird durch die Messung der Verdampfung und Kondensation des Alkohols erfasst, indem ein bestimmtes Volumen  $V$  mit Verdampfungsenthalpie pro Volumen  $r_v$  sich im Kondensationsrohr sammelt. Eine Kalibrierungsformel ermöglicht uns, durch das verdunstete Alkoholvolumen, die während der ganzen Beobachtungsperiode auf das Instrument gefallene Strahlung zu quantifizieren. Die Herleitung der Kalibrierungsformel wurde von Courvoisier und Wierzejewsky beschrieben.

#### 2.2.4 Störeffekte und auftretende Fehler

Das Bellani-Instrument ist ein nicht elektronisches Messinstrument, deshalb unterliegt es verschiedenen Fehlerarten. Es folgt eine kurze Auflistung diese Fehler.

##### 1. Ablesefehler

Einerseits kann das menschliche Auge nur mit einer bestimmten Genauigkeit die exakte Lage der Alkoholsäule ablesen, andererseits soll der Beobachter nach der *Nulllage* warten, wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben, bis die Höhe des Nullpunkts sich stabilisiert hat, so dass sie korrekt notiert wird. Die Stabilisierungszeit ist nicht konstant und braucht Geduld: bei grosser Alkoholsäule ist sie länger. Andererseits sollte man die Ablesung durchführen, wenn die Reststrahlung vernachlässigbar ist, was die Rücksetzung verlängern kann.

##### 2. Umschreibungs- und Berechnungsfehler

Die direkte Ablesung der Höhe der Alkoholsäule sowie des Nullpunktes wurden auf einem Blatt notiert, folglich wurde die Differenz ( $Y_2 - Y_1$ ) berechnet und die Kalibrierungsformel angewendet. Es kann in diesem Fall ein Fehler während der Umschreibung des Ablesungs- und Nullpunktwertes sowie durch die Anwendung der Kalibrierungsformel auftreten. Weiterhin könnte ein Umschreibungsfehler während der Digitalisierung der Werte vorkommen. Dieser Fehlertyp kann in einigen Fällen detektiert und mittels linearer Interpolation korrigiert werden.



## 2 Zirkumglobalstrahlung mit Kugelpyranometer

### 3. Systematische Fehler

Unter systematischem Fehler versteht man die Änderung der Empfindlichkeit des PBK im Laufe der Zeit. Dazu behaupten Courvoisier & Wierzejewsky, dass „Ein PBK sollte (...) erst nach etwa 20 Betriebsjahren seine Empfindlichkeit merklich zu ändern beginnen“ (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954). Aus diesem Grund soll der erste Teil der Analyse sich mit der Verifizierung der Empfindlichkeit des PBK beschäftigen. Es gibt zwei mögliche Ursachen eines systematischen Fehlers: erstens könnte Luft im evakuierten Raum zwischen die Hüllkugel  $H$  und der Empfängerfläche  $E$  eingedrungen sein, zweitens könnte es sein, dass nicht kondensierende Gase in den Destillationsraum innerhalb der Metallkugel  $M$  eindringen, womit die Destillation behindert wird (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954). Courvoisier & Wierzejewsky beschreiben die *Messung des Gasgehaltes*, ein Vorgehen wodurch die Empfindlichkeit des Instruments überprüft wird. Wenn ein Wechsel der gemessenen Werte beobachtet wird, soll man zuerst die Einwirkung eines systematischen Fehlers ausschliessen.

### 4. Fehler wegen der reduzierten Skala und Auflösung

Die Skala liegt zwischen 0.0 – 35.0 cm mit einer 0.1 Auflösung. Bei ausserordentlichen Strahlungsverhältnissen (z.B. wolkenlose Tagen mit Schnee bedecktem Boden) kann die Strahlungssumme grösser als die Skala sein und der Wert muss durch Extrapolation der Skala geschätzt werden. Andererseits kann bei strahlungsarmen Tagen der abgelesene Wert auch  $< 2.0$  cm. In diesen Fällen kann die Unschärfe der Ablesung über 10% betragen.

### 5. Fehler wegen nicht Linearität des Instrumentes bei grossen Strahlungssummen

Bei Courvoisier (1954) wird die nicht Linearität des Instrumentes in der Nähe der vollen Skala sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht: bei grossen Strahlungssummen muss man mit einer gewissen Empfindlichkeitsabnahme rechnen. Das wurde auch bei unserem Vergleich mit anderen Messungen an einzelnen Tagen gefunden, doch bleibt dieser Fehler bei Monats- oder Jahressummen eher bescheiden. Abbildung 4 stammt von Courvoisier:

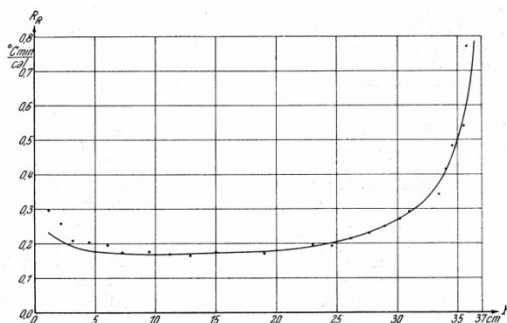
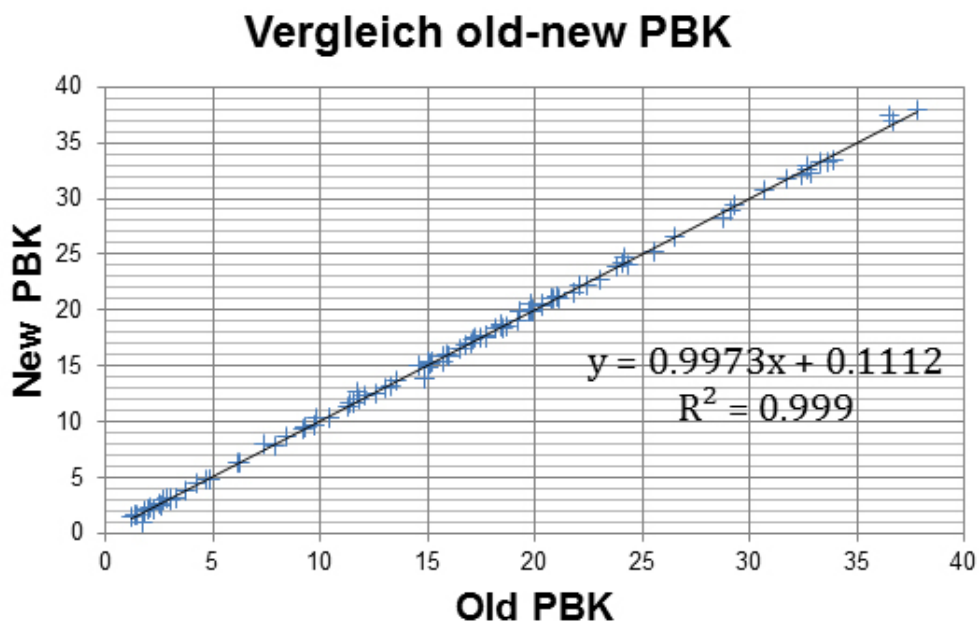


Abb. 2. Thermischer Widerstand  $R_R$  in Abhängigkeit vom Alkoholstand  $Y$ . Ausgezogene Kurve nach Berechnung, Punkte nach Messungen.

**Abbildung 4:** Thermischer Widerstand  $RR$  in Abhängigkeit vom Alkoholstand  $Y$ . Ausgezogene Kurve nach Berechnung, Punkte nach Messungen (Courvoisier & Wierzejewsky, 1954)

### 2.2.5 Reproduzierbarkeit der Messungen

Die Reproduzierbarkeit der Messungen kann durch einen Vergleich von Parallelmessungen mit verschiedenen Instrumenten geschätzt werden. In den früheren Zeiten wurden in Locarno mehrere Parallelmessungen bei Messplatzverschiebung durchgeführt. Neue Instrumente wurden durch Parallelmessungen geeicht. Ein Reserve Kugelpyranometer wurde vor kurzer Zeit in Locarno neu geeicht und aufgrund dieser Messungen kann die Reproduzierbarkeit der Messungen bestimmt werden.



**Abbildung 5:** Vergleich der 4 Monate Parallelmessungen mit dem operationellen PBK (Old) und dem Reserve-PBK (New) in Locarno, 1.1.2016 - 30.4.2016

---

Der Vergleich über 120 Tage hat folgende Ergebnisse ergeben:

- Für die meisten Tage war der Unterschied 0.0 - 0.2 cm im ganzen Messbereich, ohne besondere Richtung, also im Bereich der Auflösung.
- Die Korrelation zwischen den Messreihen war 0.999.
- Das operationelle Instrument ist etwas langsamer in der Nullsetzung (Umdrehung des Pyranometers) als das Reserveinstrument. Wenn man nicht genügend wartet, wird es eine kleinere Strahlungssumme anzeigen. An Einzeltagen wurde also > 0.5 cm Alkoholsäule weniger beobachtet.
- Am 6.3.2016 war ein wolkenloser Tag mit 20 cm Neuschnee am Boden. Beide Instrumente haben den gleichen Wert gemessen, knapp über die volle Skala, d.h. im Bereich der Empfindlichkeitsabnahme bei grossen Werten. Das bedeutet beide PBK messen praktisch identisch.

Man kann also daraus schliessen, dass die Reproduzierbarkeit ganz befriedigend ist und die Instrumente keine Empfindlichkeits- oder Alterseffekte aufweisen: Die beiden Instrumente lieferten praktisch identische Daten bei allen Strahlungsverhältnissen, obwohl sie vor 60 Jahren gebaut worden sind und nach unseren Kenntnissen lange im Freien gemessen hatten.

**Tabelle 1:** Vor- und Nachteile der PBK Messungen in der Schweiz

Pro	Kontra
Erfasst die Strahlung aus dem ganzen $4\pi$ Raum → Zirkumglobalstrahlung	Vergleich mit anderen Messinstrumenten (ZGS - HGS) nicht einfach
Sehr lange Zeitreihen (LOM und BAS seit 1954 bis heute!)	Zeitaufwändige Behandlung: Ablesung und Umschreibung → Hohe Fehlerwahrscheinlichkeit
Stromlos, integrierte Strahlungssumme	Lokale Messung (Umgebungsabhängigkeit) → Schwieriger Vergleich
Keine Wartung	Geringe Sensitivität ( $\pm 3\%$ )
Sehr stabil in der Zeit	Wenige Metadaten verfügbar  Nicht mehr produziert

## 3 Datenreihen

In diesem Kapitel wird die Zusammensetzung der Datenreihe erläutert. Erstens werden die verschiedenen Messstandorte beschrieben, zweitens werden die verschiedenen Variablen aufgelistet und drittens wird die benutzte Methode der Datenhomogenisierung zusammengestellt. Als letztes wird die Struktur der in Kapitel 4 nachfolgenden Datenanalyse dargestellt. Es handelt sich zum Teil um sehr alte Messungen; die Metadaten waren nur teilweise vorhanden.

### 3.1 Standorte

Die Metadaten zur Bellani-Messungen sind leider nicht einfach zugänglich. Nach intensiver Recherche wurden nur für die Messstation Locarno ausreichend gute Dokumentationen gefunden. Für Basel und v.a. Zürich und Davos wurden kaum Dokumentationen gefunden. Es folgt eine Beschreibung der verschiedenen Messstandorte.

Locarno-Monti: 46°11' N, 8°47' E, 380 m ü. M.:

---



**Abbildung 6:** Das heute noch in Betrieb stehende PBK in Locarno, genutzt von MeteoSchweiz.

---

Aufstellung: Bis September 1960 auf einem Flachdach im alten Institut; mit Schneeräumung mindestens für den Zugang zu den Instrumenten. Später auf der Wiese südlich des neuen Instituts, mit Schneeräumung für den Zugang zum Pyranometer (Ambrosetti, Strahlung 1, 1978). Während der Zeitreihe wurden die Geräte zwei Mal gewechselt. Der gefundene Unterschied vor- und nach dem Instrumentenwechsel (01.01.1971 und 26.6.2006) liegt trotzdem im Fehlerbereich der Instrumente (Di Marco, 2014).

Heute befindet sich das Instrument immer noch am gleichen Standort von Locarno und wird regelmässig noch jeden Abend abgelesen. Die Umgebung ist praktisch seit 1960 unverändert geblieben. Aus diesem Grund wurde die Datenreihe ab 1961 hier analysiert. Dieses PBK ist in Abbildung 6 dargestellt.

*Basel-Binningen* - 47°33' N, 7°03' E, 317 m ü. M.

Aufstellung: Im Zeitraum September 1954 – Dezember 1970 auf einer Wiese (Ambrosetti, Strahlung 1, 1978). Bei weiteren Untersuchungen ergab sich, dass die Position des Instruments mit Sicherheit seit dem Jahr 1968 unverändert ist. Es wird angenommen, dass die Wiese, auf der sich das Bellani Instrument im Zeitraum 1954 – 1968 befand, derselbe Standort wie 1968 ist. Heute noch befindet sich das Instrument im Messinstrumentenpark von Basel-Binningen und wird dort noch regelmässig jeden Tag abgelesen.

*Zürich* - 47°23' N, 9°49' E, 569 m ü. M.

Aufstellung: Im Zeitraum Oktober 1964 - Dezember 1975 auf der Wiese südlich der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt (Ambrosetti, Strahlung 1, 1978). Es wurde leider keine weitere Dokumentation über diese Messstation gefunden.

*Davos* - 46°48' N, 7°03' E, 1590 m ü. M.

Aufstellung: Im Zeitraum Januar 1944 - Dezember 1970 auf dem Flachdach des alten Observatoriums; mit Schneeräumung nur für den Zugang zu den Instrumenten (Ambrosetti, Strahlung 1, 1978). Es wurde leider keine weitere Dokumentation über diese Messstation gefunden.

Für die Stationen SMA und DAV haben wir zu wenige Daten. Zudem wurden die Messungen im Jahr 1980 unterbrochen, um eine vollständige Analyse durchzuführen.

### 3.2 Benutzte Daten

Die ganzen ZGS Daten, die in dieser Arbeit vorkommen, liegen jetzt im DWH der MeteoSchweiz. Ein Teil davon musste zuerst digitalisiert werden: Diejenigen bis 1970 waren auf Papier (Ambrosetti, 1978), andere aus den Originalbeobachtungen mit der eigenen Kalibrierung gerechnet und ein Teil schon im DWH, aber im Originalformat belassen. Eine nähere Beschreibung ist bei Di Marco (2014 und 2015) zu finden. Sämtliche Daten wurden in derselben DWH Standardeinheit umgerechnet. Anhänge A1 und A2 geben eine Übersicht über die Datenkontrolle und den Datenursprung.

### 3.2.1 Beschreibung der Variablen

#### *Zirkumglobalstrahlung [ $Wm^{-2}$ , original in $cal\ cm^{-2}$ ]*

Die kalibrierte Bellani-Messreihe. Benutztes Messinstrument: Bellani Kugelpyranometer (Davoser Modell). Kennung: ZGS.

#### *Globalstrahlung horizontal, Tagesmittel [ $Wm^{-2}$ ]*

Die Globalstrahlung gemessen auf einer horizontalen Empfängerfläche wird als direktes Vergleichsmittel benutzt. Verschiedene Messinstrumente. Kennung: HGS.

#### *Sonnenscheindauer, Tagessumme [h]*

Natürlich hängt die Zirkumglobalstrahlung direkt von der Sonnenscheindauer ab. Verschiedene Messinstrumente. Kennung: SSD.

#### *Sonnenscheindauer, relativ zur absolut möglichen Tagessumme [%]*

Dieser Parameter wurde benutzt, um wolkenfreie Tage zu identifizieren. Kennung: SSR.

#### *Lufttemperatur 2m über Boden, Tagesmittel [ $^{\circ}C$ ]*

Wegen des thermischen Effekts auf das Instrument, muss auch die mittlere tägliche Lufttemperatur berücksichtigt werden. Kennung: TMT.

#### *Gesamtschneehöhe, Morgenmessung [cm] und Abendmessung[cm]*

Die vom Boden reflektierte Globalstrahlung beeinflusst die Messung des PBK, deshalb muss man auch die durch Anwesenheit von Schnee erhöhte Reflektivität des Bodens berücksichtigen. Beide Messungen wurden manuell durchgeführt. Kennung: SHM bzw. SHA.

Die Daten der Globalstrahlung horizontal, die relative und die absolute Sonnenscheindauer sind für die ganze Periode noch nicht homogenisiert. Dies ist insbesondere auf die Automatisierung der Messungen ab dem 1.1.1981 und den Instrumentenwechsel im Rahmen des SwissMetNet im Jahr 2006 zurückzuführen. Aus diesem Grund fokussiert sich die Analyse hauptsächlich auf die Periode ab dem 1.1.1981.

### 3.2.2 Kalibrierungsfaktoren und Einheiten

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, drückt das Bellani-Instrument die Strahlungssumme eines Zeitintervalls als verdunstete mm von Alkohol aus. Durch eine Kalibrierungsformel erhält man dann die Werte in  $\text{cal}/\text{cm}^2$  (ursprüngliche gebrauchte Einheit). Jedes PBK hat seine eigene Kalibrierungskonstante K. Tabelle 2 stellt die verschiedenen Kalibrierungskonstanten der Messstationen dar:

**Tabelle 2:**

Benutzte Kalibrierungswerte für die verschiedenen Standorte. Die Kalibrierung verwendet die Strahlungsreferenzskala der 50ziger Jahre des letzten Jahrhunderts; die Absolutwerte sind deshalb mit Vorsicht zu geniessen.

Ort	Zeitraum	Kalibrierungsformel
LOM	01.01.1954 – 31.12.1970	$\text{Ablesungswert}[\text{cm}] * (8.5 - 0.02 * \bar{T}[\text{°C}])$
	26.06.2006 – 31.12.2015	
	01.01.1971 – 25.06.2006	$\text{Ablesungswert}[\text{cm}] * (9.0 - 0.02 * \bar{T}[\text{°C}])$
BAS	01.01.1954 – 31.12.2015	$\text{Ablesungswert}[\text{cm}] * (9.3 - 0.02 * \bar{T}[\text{°C}])$
SMA	01.01.1964 – 31.12.1980	$\text{Ablesungswert}[\text{cm}] * (9.0 - 0.02 * \bar{T}[\text{°C}])$
DAV	01.01.1954 – 31.12.1980	unbekannt

Weitere Bemerkungen zu den einzelnen Standorten:

- Locarno Die erhaltenen Werte waren teilweise kalibriert (1954-1970) und teilweise nicht kalibriert (ab 1971). In der Formel wurde die Tagesmitteltemperatur benutzt.
- Basel Die erhaltenen Werte waren schon kalibriert. Es wurden vermutlich ab 1982 standardisierte Kalibrierungsfaktoren benutzt. In der Formel wurde die Monatsmitteltemperatur anstatt der Tagesmitteltemperatur benutzt.
- Zürich Die erhaltenen Werte von 1971-1980 waren nicht kalibriert. Sie wurden mit der Tagesmitteltemperatur umgerechnet.
- Davos Die erhaltenen Werte waren bereits kalibriert.

Um ZGS mit HGS vergleichen zu können, wurden beide in dieselbe Einheit  $\text{Wm}^{-2}$  als mittlere Tageswerte umgerechnet (gebrauchte DWH Einheit).



## 3 Datenreihen

## 3.2.3 Datenverfügbarkeit und Messinstrumente

Seit 1954 wurden mehrmals die Messinstrumente für jede Variable gewechselt, deshalb sind die Resultate, vor allem vor dem Jahr 1981, vorsichtig zu interpretieren. Alle Daten wurden aus der DWH der MeteoSchweiz extrahiert, mit Ausnahme der ZGS Daten, die teilweise noch digitalisiert werden mussten.

**Tabelle 3:** Die folgende Tabelle stellt eine Übersicht der Verfügbarkeit der Variablen für alle vier Standorte dar.

	ZGS	HGS	SSD	SSR	TMT	SHM	SHA
Locarno	1954 – 2015	1957 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1981 – 2015
Basel	1954 – 2015	1981 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1954 – 2015	1981 – 2015
Zürich	1964 – 1980	1981 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1981 – 2014
Davos	1954 – 1980	1981 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1954 – 2014	1981 – 2014

### 3.3 Datenbereinigung

#### 3.3.1 Identifizierung der Ausreisser in Locarno

Die Identifizierung der Ausreisser wurde durch Vergleich der gemessenen Daten mit den anderen Parametern durchgeführt, die im vorherigen Kapitel aufgelistet sind.

Wie bereits in Kapitel 2.2.4 erläutert, sind die zu erwartenden Fehler vor allem Umschreibungsfehler, da die Daten der Zirkumglobalstrahlung digitalisiert wurden, sowie auch Ablesefehler und systematische Fehler. Fehlende Ablesungen wurden mit empirischen Methoden ausgefüllt (i.a. 1-2 pro Jahr). Ziel der nachfolgenden Vorgehensweise war die Identifizierung von Umschreibungs- und Ablesefehler.

Als erstes Vergleichsmittel wurde die kalibrierte Ablesung des Pyranometers in  $\text{Whm}^{-2}$  benutzt. Dies diente vor allem dazu, Umschreibungsfehler zu finden. Zweitens wurde der Quotient der horizontalen Globalstrahlung mit der Zirkumglobalstrahlung berechnet. Dieses Verhältnis weist eine Saisonalität auf. Drittens wurde der Quotient der Sonnenscheindauer und der Zirkumglobalstrahlung berechnet. Die Saisonalität ist hier geringer.

**Tabelle 4:** Darstellung der Parameter zur Festlegung der Ausreisser:

Parameter	Abkürzung [Einheit]	Normal Intervall		Bemerkungen
<b>Zirkumglobalstrahlung</b>	<i>ZGS</i> [Whm <sup>-2</sup> ]	Range	0 - 4000	Hauptsächlich um Schreibfehler zu identifizieren.  Die Saisonalität hängt von der Bestrahlungsdauer ab.
		Mehrheit	2000 - 3500	
		Saisonalität		
		Winter	2000 - 2500	
		Frühling/Herbst	2500 - 3250	
		Sommer	3250 - 4000	
<b>Sonnenscheindauer / Zirkumglobalstrahlung</b>	<i>SSD/ZGS</i> [h(Jcm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup> ]	Range	0 - 0.012	Die Grenzen der Intervalle weisen eine hohe Variabilität auf. Die Saisonalität hängt von der Intensität der Direktstrahlung ab.
		Mehrheit	0.008 - 0.012	
		Saisonalität		
		Winter	0.009 - 0.012	
		Frühling/Herbst	0.007 - 0.011	
		Sommer	0.006 - 0.01	
<b>Globalstrahlung horizontal / Zirkumglobalstrahlung</b>	<i>HGS/ZGS</i> [einheitslos]	Range	0.8 - 2.5	Hohe Variabilität der Intervallgrenzen. Die Saisonalität hängt vom Winkel der einfallenden Direktstrahlung ab.
		Mehrheit	1 - 2.4	
		Saisonalität		
		Winter	1 - 1.5	
		Frühling/Herbst	1.5 - 2	
		Sommer	2 - 2.5	

Ein weiterer benutzter Vergleichsparameter ist die Schneehöhe, um zu sehen, ob die Reflektivität der Erdoberfläche die Zirkumglobalstrahlung beeinflusst hat. In Locarno ist dieser Effekt nicht bemerkenswert, insbesondere weil der Boden durch den Schnee nur an wenigen Tagen im Jahr bedeckt wird. Um einen wesentlichen/eindeutigen Effekt der Änderung der Reflektivität der Bodenoberfläche messen zu können, braucht man mindestens einen Tag mit wesentlichem Schneefall und der darauffolgende Tag soll bewölkungsfrei sein. Diese Bedingungen wurden am 13.4.1986 und am 5.3.2016 mit Sicherheit erfüllt. An diesen Tagen gab es die besten Voraussetzungen, um einen solchen Effekt messen zu können. Sonst wurde die Albedo Variation nicht untersucht und somit vernachlässigt, weil einzelne Tage nicht analysiert wurden.

Alle Tage, die sich mit einem Parameter nicht in dem als normal etablierten Intervall befanden, wurden als „nicht zuverlässig“ (fragwürdig) klassifiziert. Diese Tage wurden dann mittels originalen Beobachtungshefter verifiziert und, wenn nötig, korrigiert. Wenn die nicht zuverlässigen Daten kein

Schreibfehler waren, wurden sie mit anderen Messreihen (horizontale Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, usw.) verglichen. Falls die abnormale Werte weiterhin keine plausible Erklärung hatten, wurden letztlich die Tagebücher der meteorologischen Beobachtungen in Locarno als ultimative Kontrolle benutzt. Ein nicht zuverlässiges Datum wurde nur als Ausreisser klassifiziert, wenn alle vorherigen Voraussetzungen erfüllt waren.

Insgesamt wurden 181 Daten als nicht zuverlässig klassifiziert, wovon 55 als Ausreisser klassifiziert und eliminiert worden sind.

### 3.3.2 Reproduzierbarkeit der Messungen

Die benutzte Methode der Datenvervollständigung war die Interpolierung anhand des mittleren Verhältnisses HGS/ZGS der vorherigen 20 Tag. Die ZGS Daten für Locarno wurden komplett vervollständigt, während von den 40 fehlenden ZGS Daten aus Basel leider nur 4 interpoliert wurden, da auch die notwendigen HGS Werte vor 1980 nicht vorhanden sind. HGS und SSD Daten wurden nicht untersucht und homogenisiert.

Die HGS Daten von Locarno vor 1980 (Beginn von ANETZ) sind mit Vorsicht zu geniessen: damalige Registrierstreifen wurden digitalisiert und eine allfällige Kontrolle ist nicht bekannt. Für Zürich ZGS fehlt ein Wert, hingegen in Davos fehlt eine 398 Tage lange Messperiode.

## 3.4 Aktueller Datenbestand in der MeteoSchweiz DWH

**Tabelle 5:** ZGS Daten über CLIMAP (mittlere Tageswerte in W/m<sup>2</sup>):

Parameter: 172 (gci000d0)

Stationen : BAS, DAV, SMA und LOM

Station	ZGS Daten	Was wurde gemacht
Locarno 1954 - 2015	Komplette Datenreihe	- Mögliche Ausreisser bezeichnet (insgesamt 55 Werte)
Basel 1954 - 2015	40 fehlende ZGS Werte	- 4 Werten wurden anhand mittleren HGS/ZGS Verhältnis der vorherigen 20 Tage rekonstruiert - 36 wurden nicht rekonstruiert - Keine Bezeichnung der Ausreisser
Zürich 1964 - 1980	1 fehlend	- Daten nicht interpoliert - Keine Bezeichnung der Ausreisser
Davos 1954 - 1980	398 fehlend	- Daten nicht interpoliert - Keine Bezeichnung der Ausreisser

Es ist vorgesehen, die Messungen in BAS und LOM weiterzuführen und die Daten jährlich ins DWH abzuspeichern.

## 4 Datenanalyse

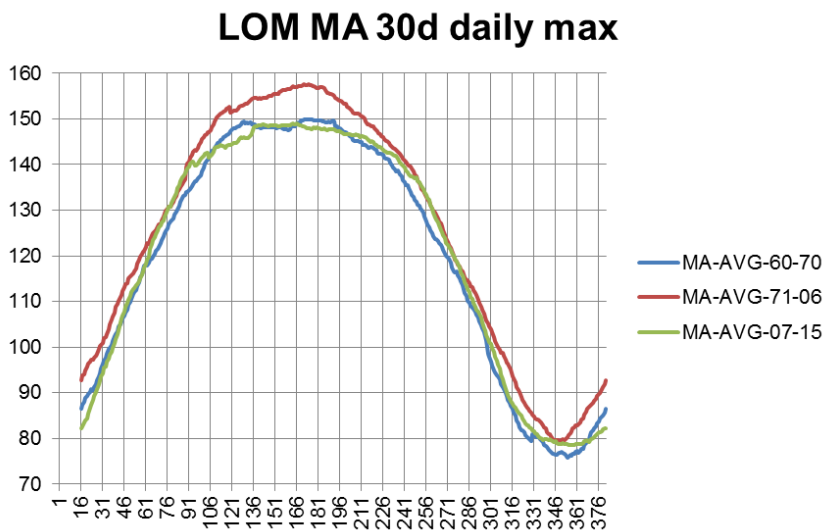
Die Datenanalyse besteht aus zwei verschiedenen Teilen. Im ersten Teil will man überprüfen, ob systematische Fehler aufgetreten sind. Nach der Bestätigung der Empfindlichkeit des PBK will man die zeitliche Entwicklung der Zeitreihe untersuchen.

### 4.1 Homogenität der Zirkumglobalstrahlungs-Messreihen

Die Zirkumglobalstrahlung hängt von der Sonnenhöhe, dem Bodenalbedo, den Bewölkungs- und Trübungsverhältnissen der Atmosphäre ab, was die Homogenisierung der Messreihe erschwert. Man muss deshalb „ähnliche“ Messungen vergleichen, damit allfällige Inhomogenitäten identifiziert und nach Bedarf korrigiert werden können.

In Locarno gab es zwei Instrumentenwechsel und man muss daher untersuchen, ob eine Empfindlichkeitsänderung während des Betriebes über all die Jahre stattfand. Der Vorteil ist, dass dasselbe Instrument in der ersten und dritten Periode benutzt wurde. Das zweite Instrument wurde in der Mitte benutzt.

Es wurden jeweils die absoluten Tagesmaxima für jede Periode gewählt und ein 30 Tage gleitendes Mittel gebildet. Auf diese Weise werden die Bewölkungseffekte ausgeschlossen; mit der Benützung des gleitenden Mittels werden allfällige Trübungsunterschiede auch beseitigt.



**Abbildung 7:** 30 Tage gleitendes Mittel der maximalen Tageswerte der ZGS in LOM für die drei Zeitintervalle 1960-70, 1971-2006, 2007-15

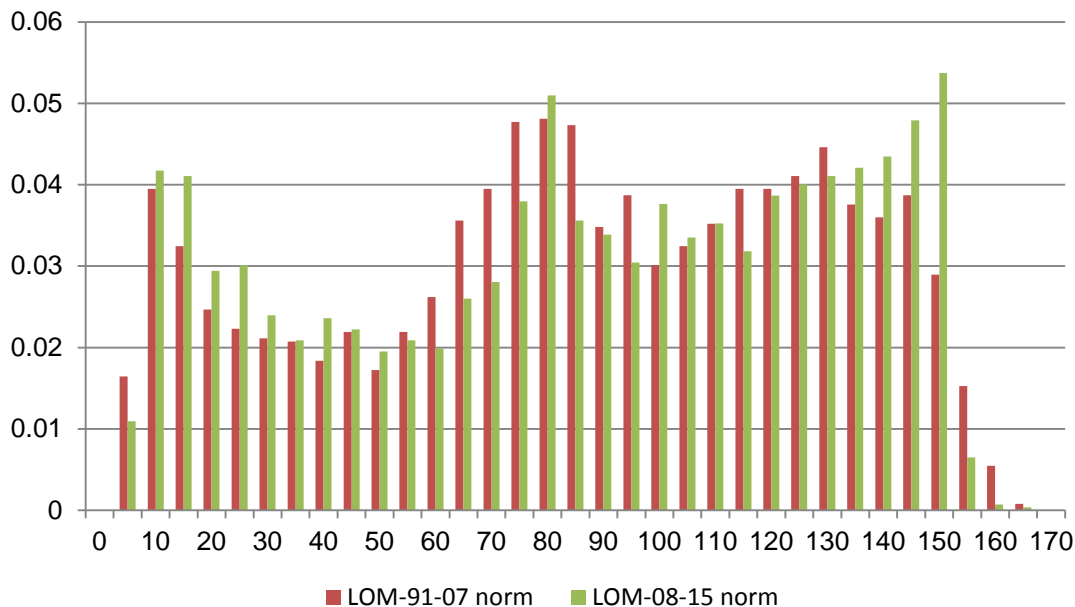
---

Wir wissen, dass die absoluten Maxima i.A. keine robuste Statistik bilden, doch kann man folgende Aussagen ableiten:

- Das Instrument N61623, das in der ersten und dritten Periode eingesetzt wurde, hat keine bemerkbare Änderung der Empfindlichkeit erlebt.
- Das N67294 zeigt besonders im Sommer eindeutig höhere Maxima. Eine mögliche Erklärung ist die: Wegen seiner tieferen Empfindlichkeit (Kalibration 9 statt 8.5), kommt es aufgrund der bekannten Empfindlichkeitsabnahme weniger nahe an die obere Skalengrenze (siehe Kap. 2.2.4).

Es wurde auch die Verteilung aller Messungen in den zwei letzten Perioden untersucht, um mögliche systematische Änderungen zu identifizieren.

## LOM normierte Häufigkeit



**Abbildung 8:** Normierte Häufigkeit der LOM täglicher ZGS für die Zeitintervalle 1991-2007, 2007-15 (Anteil für die einzelnen Intervalle)

Auch diese Daten bestätigen die Abnahme der Empfindlichkeit des N61623 an der oberen Skalengrenze. Die höhere Häufigkeit in den höheren Werten ist nicht durch das Instrument, sondern durch klimatische Änderungen verursacht (siehe folgendes Kapitel).

Ansonsten kann man keine erkennbaren Differenzen bei den beiden Instrumenten erkennen. Es wurde schon bestätigt (Di Marco, 2014), dass die Messungen des Bellani-Instrumentes in Locarno trotz des zweimaligen Austausches des Instrumentes im Rahmen seiner Messgenauigkeit homogen und zuverlässig sind. Die dafür benutzte Methode war der Vergleich der kumulativen Summen der ZGS Tageswerte vor und nach dem Instrumentenwechsel. Es ist zu vermerken, dass beim zweiten Wechsel das früher eingesetzte alte Instrument wieder in Betrieb genommen wurde.

### 4.2 Erkennung von klimatologischen Trends

Ziel dieses Kapitel ist die Analyse der Datenreihe, um Trends in der Messperiode zu finden. Man vergleicht zuerst die langjährige Entwicklung der ZGS an allen Messorten, um mögliche Korrelationen unter den Stationen zu erkennen.

## Vergleich der langjährigen ZGS Messungen

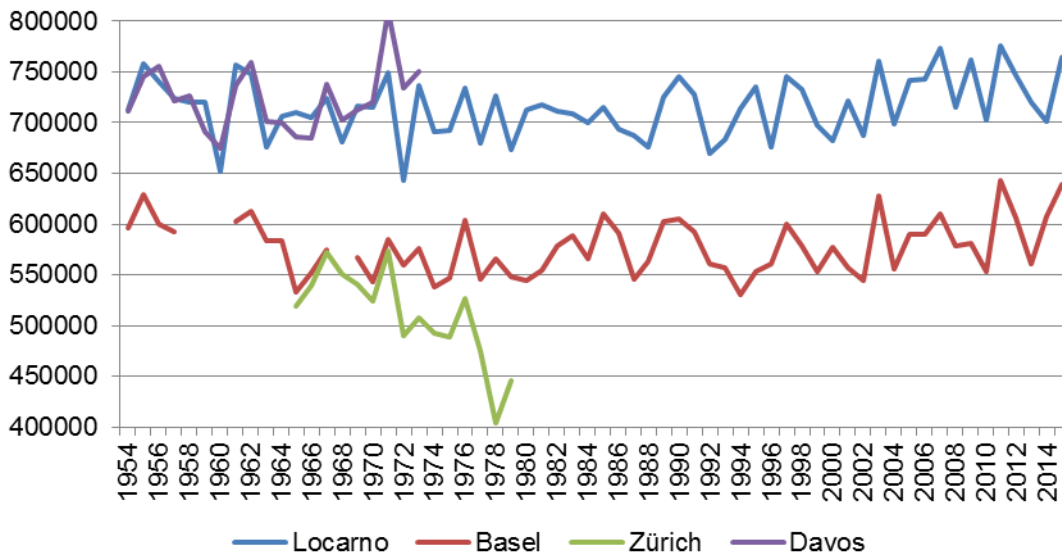


Abbildung 9: Vergleich aller ZGS Jahressummen an den 4 Standorten

Aus diesem Vergleich kann man folgendes feststellen:

- Es gibt eine gute Korrelation zwischen Locarno und Davos, sowohl bei den absoluten Werten als auch in der Variation. Fragwürdig ist die Abweichung in den letzten 3 Messjahren, als in Davos eindeutig höhere Werte als in Locarno gemessen wurden.
- Man erkennt die systematisch tieferen Messungen in Basel und Zürich als in Davos und Locarno.
- Die Daten in Zürich zeigen tiefere Werte als Basel nach 1971 bis Ende der Messungen. Der Grund kann eine Empfindlichkeit Abnahmen des Instrumentes sein.



Aus diesen Gründen wurde darauf verzichtet, die Daten von Davos und Zürich näher zu untersuchen, mit Ausnahme des Schneeeffektes auf die reflektierte Strahlung in Davos. Das PBK in Locarno wurde 1960 auf die Wiese platziert und blieb seither dort unverändert stehen. Aus Homogenitätsgründen wurde daher die Analyse nur ab 1960 durchgeführt.

Wir nehmen jetzt an, die Daten in LOM und BAS seien homogen und möchten klimatologische Trends finden. Neben der Zirkumglobalstrahlung wurden auch die Sonnenscheindauer, die Bewölkung und die Globalstrahlung horizontal ausgewertet, obwohl diese Datenreihen noch nicht homogenisiert wurden.

Um die verschiedenen Datenarten zu vergleichen, wurden sie normalisiert und dann nur die Anomalien dargestellt, das heisst: Normierter Wert = (Originalwert- Mittelwert)/ Mittelwert.

Um die Schwankungen abzdämpfen, wurden zwei Methoden angewendet:

- mehrjähriges gleitendes Mittel der Tageswerte;
- „Changing Point“ Methode nach Pettitt (1979), um den Zeitpunkt der Änderung zu finden.

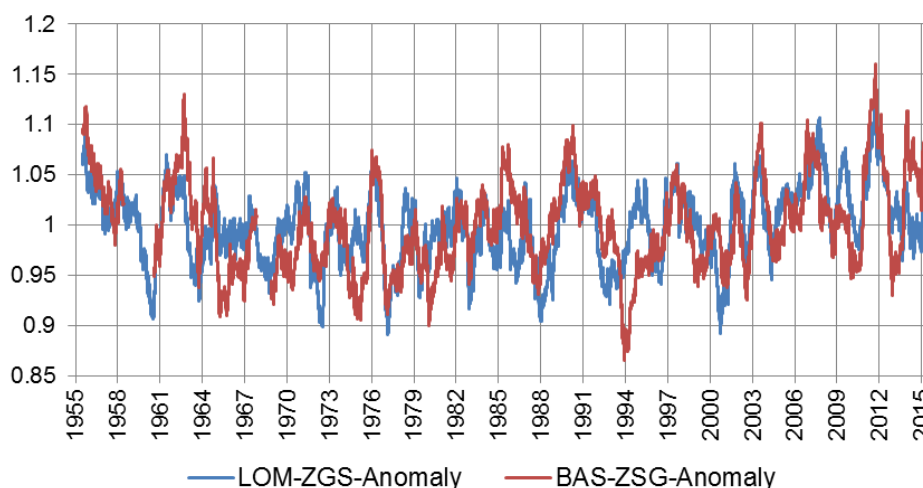
#### 4.2.1 Vergleich zwischen LOM und BAS Zirkumglobalstrahlung

Für LOM wurde die ganze Datenreihe benutzt, weil sie vollständig vorliegt, hingegen für BAS nur ab Juni 1968, weil der ganze Mai des Jahres 1968 fehlt.

Hier der Vergleich vom einjährigen gleitenden Mittel für LOM und BAS.

---

### ZGS anomaly 1y moving average



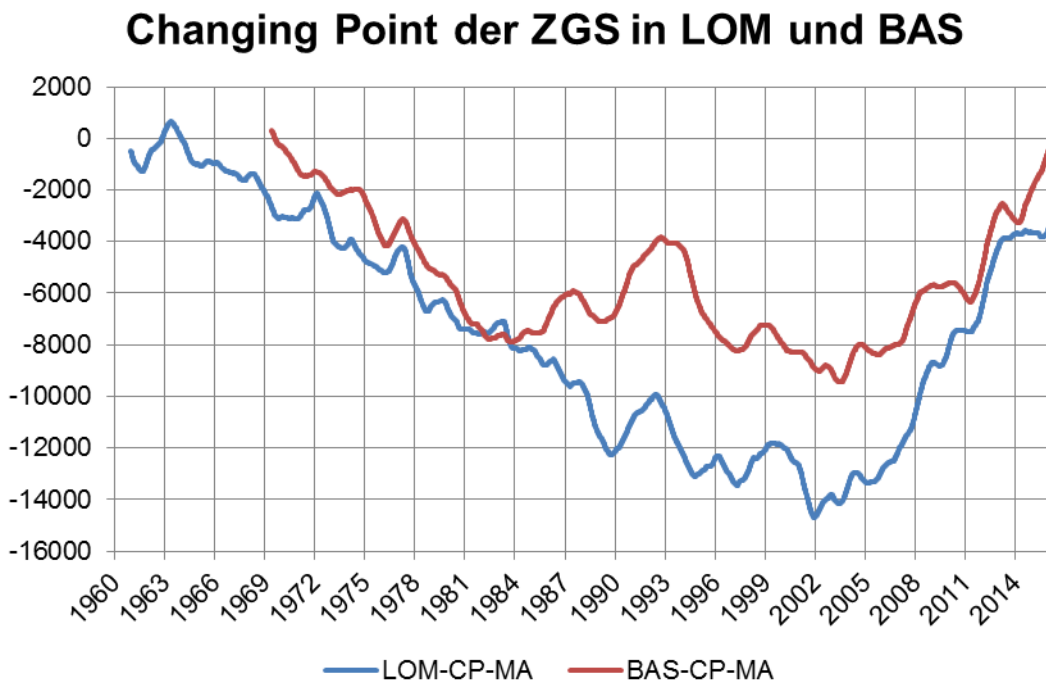
**Abbildung 10:** Einjähriges gleitendes Mittel der täglichen ZGS Anomalien in LOM und BAS

---

Bemerkungen:

- Für LOM bis Ende des 20. Jahrhunderts ist kein besonderer Trend zu erkennen, dann eine rasche Zunahme und eine Stabilisierung um einen höheren Mittelwert. Die Zunahmen der ZGS ist im Bereich von 2-3%, das entspricht im Durchschnitt  $+2-3 \text{ W/m}^2$  bei mittleren Jahreswerten von  $81 \text{ W/m}^2$ .
- Für BAS kann man eine ähnliche Entwicklung nach Ende der 90er Jahre feststellen, früher waren die Schwankungen stärker als in LOM.

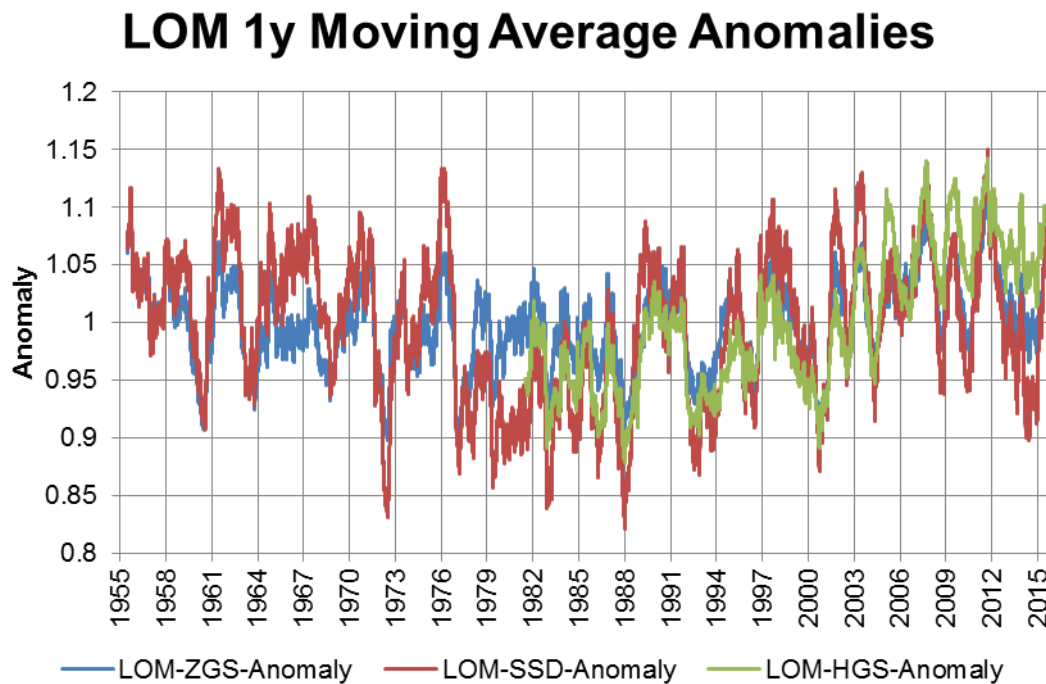
Um den „genauen“ Zeitpunkt der Änderung zu identifizieren wurde die „Changing Point“ Methode angewendet (Summe der Schwankungen vom Mittelwert). Hier wurden die Tagesdaten in jährlichen Mitteln geglättet.



**Abbildung 11:** Changing Point in LOM und BAS

Eindeutig zu erkennen ist ein Zeitpunkt der Änderung in Richtung einer Zunahmen, ab 2001 in LOM, um ca. ein Jahr später in BAS. Die „Stabilisierung“ auf einem höheren Niveau der letzten 5 Jahre in LOM wird auch mit dieser Methode bestätigt.

Wir vergleichen jetzt die ZGS mit anderen Strahlungsdaten, um Kohärenz oder Diskrepanzen unter verschiedenen Grössen im Laufe der Jahre zu identifizieren. Zuerst werden ZGS, Globalstrahlung horizontal sowie Sonnenscheindauer und dessen Anomalien in LOM untersucht.

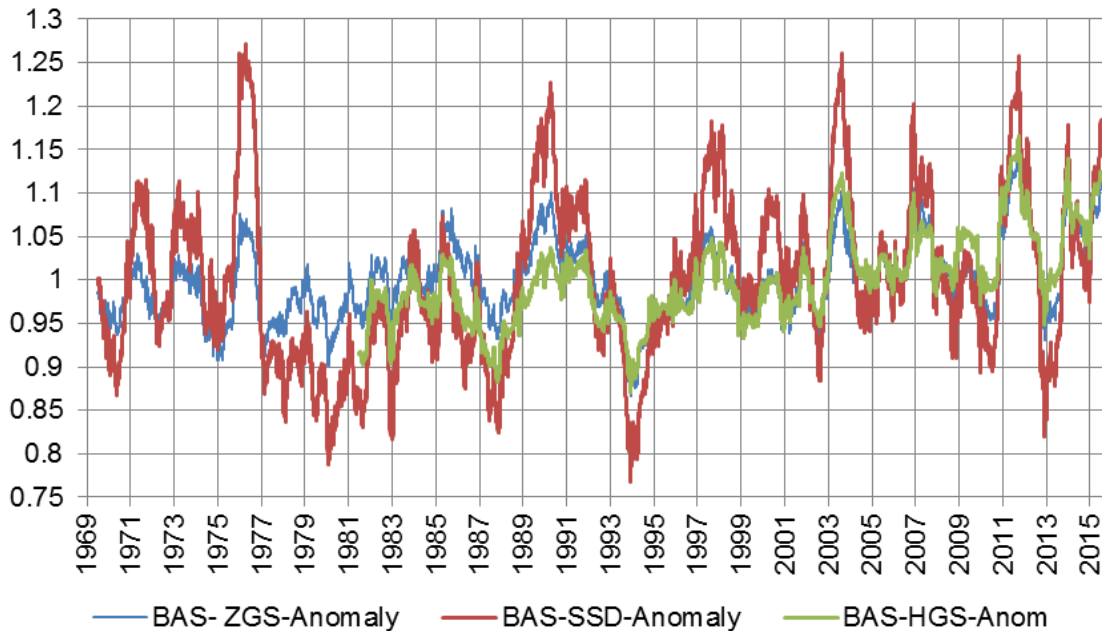


**Abbildung 12:** 1-jährige gleitende Mittel der täglichen Anomalien von ZGS, Globalstrahlung horizontal und Sonnenscheindauer in LOM

Bemerkungen:

- Der Ablauf der drei Variablen zeigt eine ähnliche Entwicklung über die ganze Messdauer, doch ist die Amplitude der ZGS etwas „gedämpft“ gegenüber HGS und SSD. Die Übereinstimmung ist besser nach der Einführung vom ANETZ im 1981.
- SSD und HGS zeigen das global *Dimming* ab Mitte der 70er Jahre und anschliessend das global *Brightening* ab Ende der 80er Jahre. ZGS zeigt kaum ein *Dimming*. Eine nähere Untersuchung soll nach der Homogenisierung der SSD und HGS Daten durchgeführt werden.

## BAS 1y Moving Average Anomalies

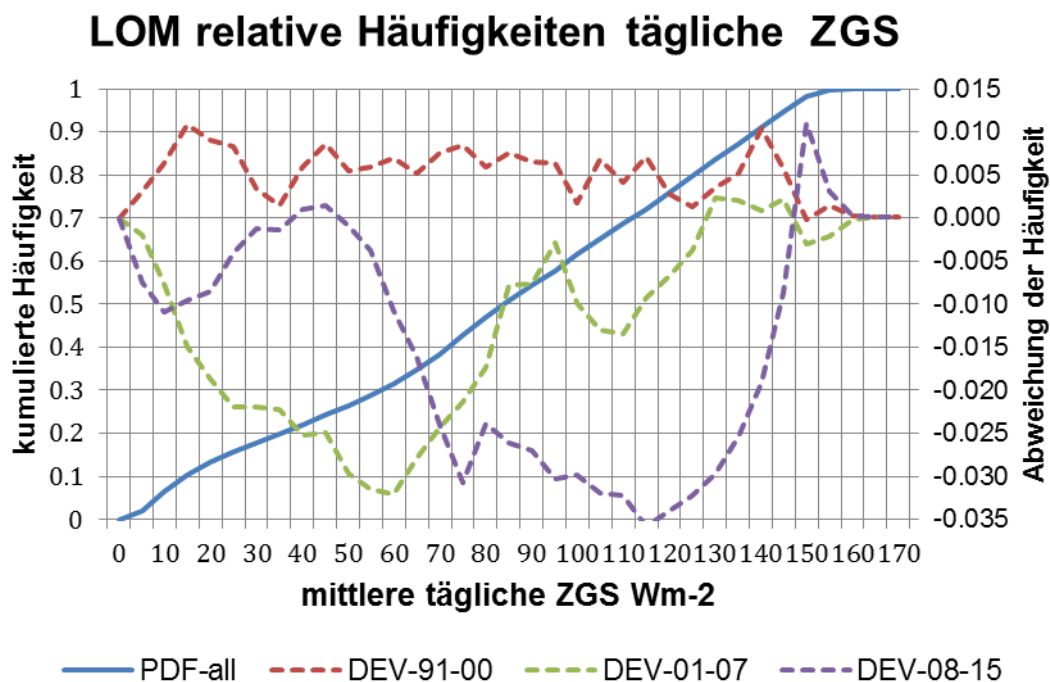


**Abbildung 13:** 1-jährige gleitende Mittel der täglichen Anomalien von ZGS, Globalstrahlung horizontal und Sonnenscheindauer BAS

- In Basel zeigten alle Variablen auch eine Übereinstimmung im Ablauf, wenn auch mit etwa „gedämpften“ absoluten ZGS Werten am Anfang.

Wir haben keine Erklärung für den „gedämpften“ ZGS Verlauf: Diese Ergebnisse betonen die Schwierigkeiten der Analysen von langjährigen Strahlungsmessreihen. In unseren weiteren Untersuchungen haben wir uns im Wesentlichen auf die letzten 25 Jahre beschränkt.

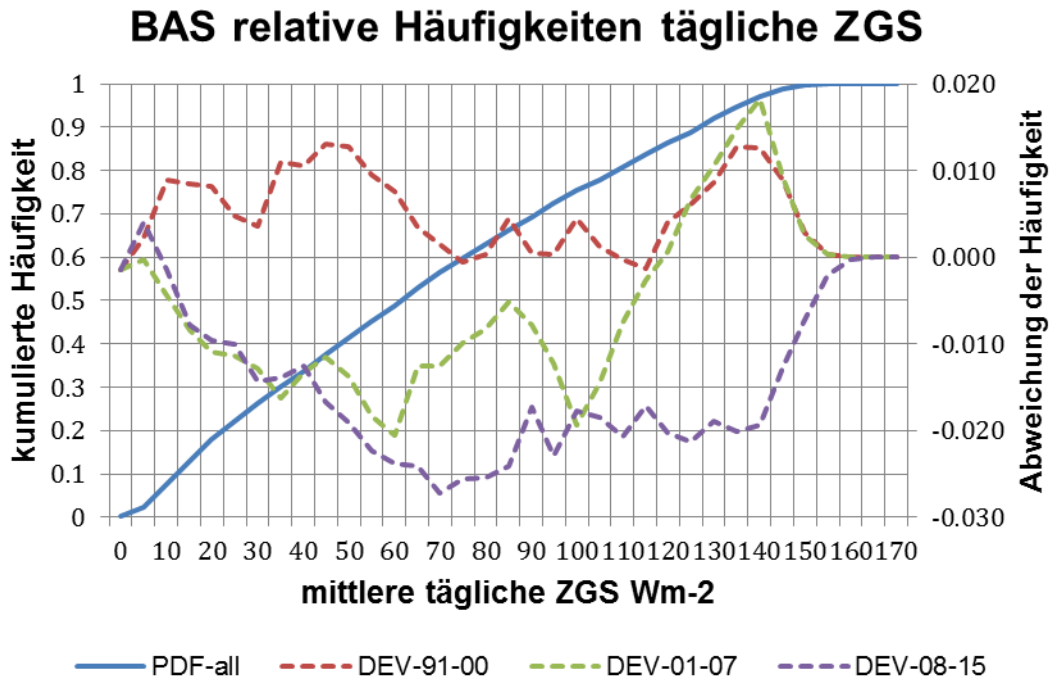
Die Mittelwerte geben keine Auskunft über die Verteilung der einzelnen Werte. Sie zeigen aber drei Perioden in den letzten 25 Jahren, die näher untersucht wurden und zwar 1990-2000, 2001-2007, 2008-2015. Die nächsten Bilder zeigen die normierte kumulierte Verteilung der ZGS Tageswerte:



**Abbildung 14:** Kumulierte Häufigkeit der ZGS Tageswerte in Locarno für die Perioden 1990-2015 (blau) und die relative Abweichung für die Intervallen 1990-2000, 2001-07, 2008-15.

Man kann folgendes feststellen:

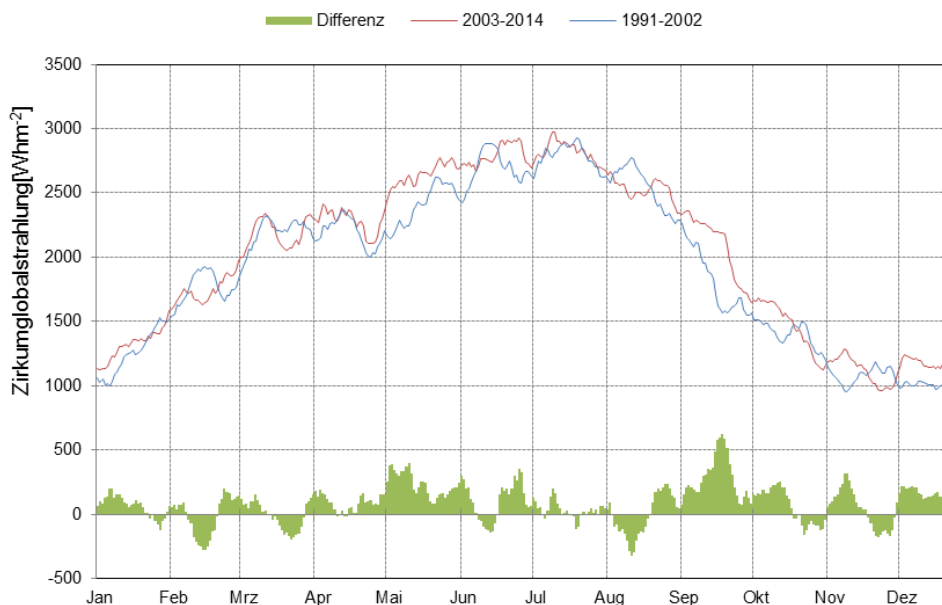
- In der zweiten Periode waren weniger tiefe Tagessummen als in den anderen, wo eine ähnliche Verteilung beobachtet wurde;
- bei den höheren Werten hingegen waren in den ersten zwei Perioden ähnliche Verteilungen, da die letzten Jahre häufig höhere Daten zeigen. Diese sind wahrscheinlich auf häufigere sonnige Tagen zurückzuführen, was auch bei der SSD der Fall war.



**Abbildung 15:** Kumulierte Häufigkeit der ZGS Tageswerte in Basel für die Perioden 1990-2015 und die relative Abweichung für die Intervallen 1990-2000, 2001-07, 2008-15.

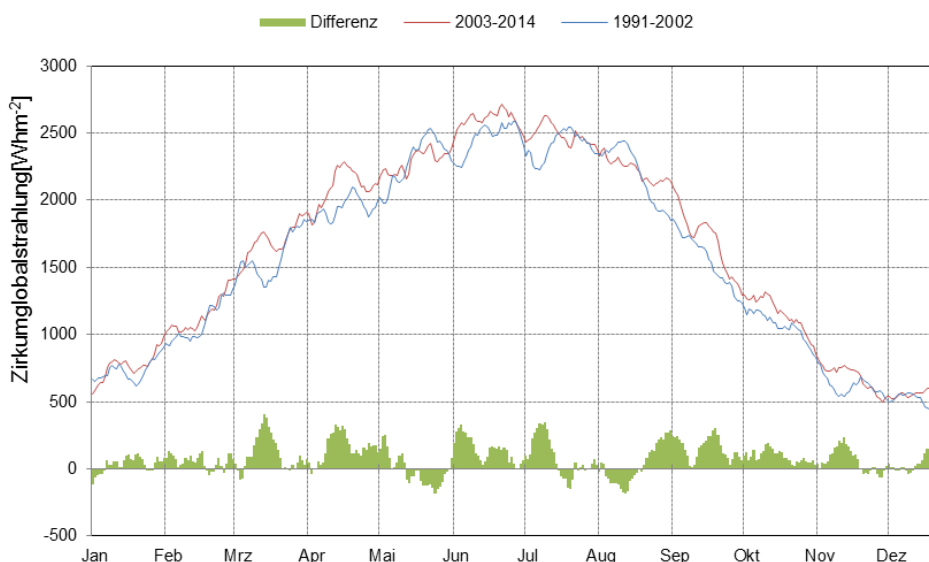
- In Basel waren die tieferen Werte in der ersten Periode häufiger als später.
- Die grösseren Mittelwerte lassen sich in der dritten Periode mit den häufigeren sonnigeren Tagen wie in Locarno erklären.

Man stellt sich nun die Frage, ob sich diese Zunahme in einem bestimmten Monat im Jahr konzentriert. Der Jahreslauf der verschiedenen Perioden und ihre Differenz sind in den folgenden Grafiken dargestellt. Um die Kurven zusammenstellen zu können, wurde erstens der Mittelwert für jeden Jahrestag berechnet, und zweitens auf 10 Tage mittels gleitendem Mittel geglättet.



**Abbildung 16:** Über 10 Tage zentral gleitendes Mittel der ZGS Tageswerte in Locarno; grün ist die Differenz 2003-2014 / 1991-2002

In Locarno ist die Zunahme der ZGS zwischen Mai und September konzentriert. Im September ist diese maximal.



**Abbildung 17:** Auf 10 Tage zentral gleitendes Mittel der ZGS Tageswerte in Basel-Binningen; grün ist die Differenz 2003-2014 / 1991-2002

Die Zunahme der ZGS ist in Basel ziemlich homogen und findet vor allem im März, April, Mitte August bis September statt. Die maximale Abweichung findet im März statt.

## 4.3 Vergleich mit anderen Strahlungsmessreihen

### 4.3.1 SACRaM direkte und diffuse Strahlung

Während die Globalstrahlung auf einer horizontalen Fläche vom Sonnenstand und der resultierenden Direktstrahlungskomponente abhängt, ist dies beim Kugelpyranometer nicht der Fall. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich zwischen den Bellani-Instrumenten Messungen und denjenigen in Locarno durchgeführte SACRaM Beobachtungen (Swiss Alpine Climate Radiation Monitoring) angestellt. Für diese Analyse wurden provisorische Daten aus dem Jahr 2015 benutzt.

Die SACRaM 1 Minuten Werte wurden in Tagessummen aggregiert. Folgende Annahmen wurden getroffen:

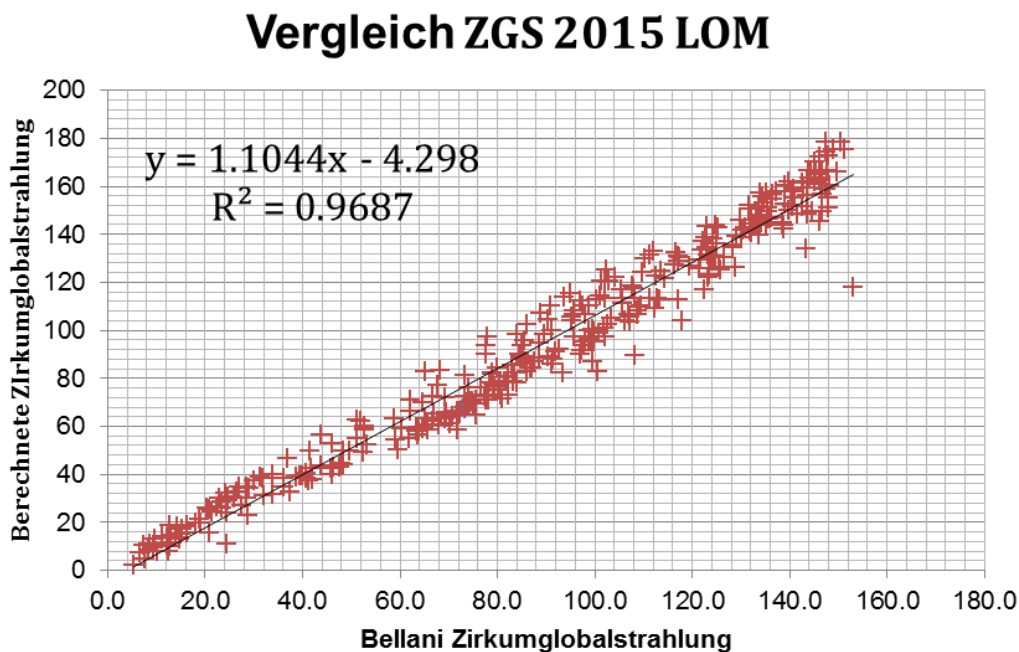
- a) Die diffuse und die reflektierte Strahlungen seien isotrop, so entsteht keine Winkelabhängigkeit und man kann sie mit der nicht direkten einfallenden Strahlung auf einer Kugel vergleichen. Für die Umrechnung wurde die von Schüepp (1960) vorgeschlagene Annäherung angewendet, d.h. die auf eine Kugel einfallende Strahlung sei die Hälfte derjenigen einer Strahlung auf eine horizontale Fläche.
- b) Das Bodenalbedo sei 0.2 das ganze Jahr hinweg. In der Tat waren wenige Tagen mit Schnee am Boden, sie können daher für diese Analyse vernachlässigt werden. So kann die reflektierte Strahlung mit der Globalstrahlung berechnet werden.
- c) Für die direkte Strahlung wurde die auch von Schüepp berechnete geometrische Umrechnung auf eine Sphäre angewendet (1/4 der auf einer Fläche einer Kugel mit demselben Durchschnitt).

Danach wurde eine „berechnete“ Zirkumglobalstrahlung für jeden Tag berechnet:

$$\text{ZGSber} = 0.25 * \sum \text{direkte Strahlung} + 0.5 * \sum \text{diffuse Strahlung} + 0.5 * 0.2 * \sum \text{globale Strahlung}$$



Die Tagessummen der gemessenen ZGS Daten wurden mit dieser Berechneten verglichen:



**Abbildung 18:** Vergleich berechneter und Bellani ZGS für Tagessummen in Locarno im Jahr 2015

Die Übereinstimmung der Tageswerte ist gut und nur wenige Ausreisser liegen vor (vielleicht sind dies Fehler). Man erkennt die leichte Abnahme der Empfindlichkeit vom Kugelpyranometer für die höchsten Werte (vgl. Kap. 2.2.4).

Das Verhältnis dieser gemessenen und berechneten ZGS Jahressumme der Tageswerte für 2015 lautet 0.948. Wir möchten hier betonen, dass unsere PBK die originale Kalibrierung der 1950ziger Jahre benutzen; sie sollten nach der aktuellen Skala angepasst werden.

Schlussfolgerungen aus diesem Vergleich:

- Die Annäherungsformel für die Berechnung der Zirkumglobalstrahlung auf Grund der SACRaM gemessenen Komponenten ist korrekt. Die Streuung bei den einzelnen Tagen ist auf die Anisotropie der Diffus- und Reflexstrahlung zurückzuführen.
- Das Verhältnis der Jahressummen ist gut. Das bestätigt die langzeitige Stabilität des Bellani Kugelpyranometers.
- Die lange Messreihen des Bellani Kugelpyranometer sind für klimatologische Untersuchungen geeignet. Wir verfügen über keine andere Strahlungsinstrumente, die so lange stabil gemessen haben!!

#### 4.3.2 Zirkumglobalstrahlung und diejenige auf einen Würfel ohne Grundfläche

Zwischen dem 1.5.1960 und dem 31.12.1980 wurden auf dem Dach in Locarno, neben den üblichen Strahlungsmessungen, vier Pyranometer vertikal aufgestellt, die in die 4 Himmelsrichtungen schauten. Mit dem horizontalen Pyranometer hat man also die Strahlung auf einem Würfel ohne Grundfläche. In erster Näherung kann man ihn mit einer Kugel vergleichen.



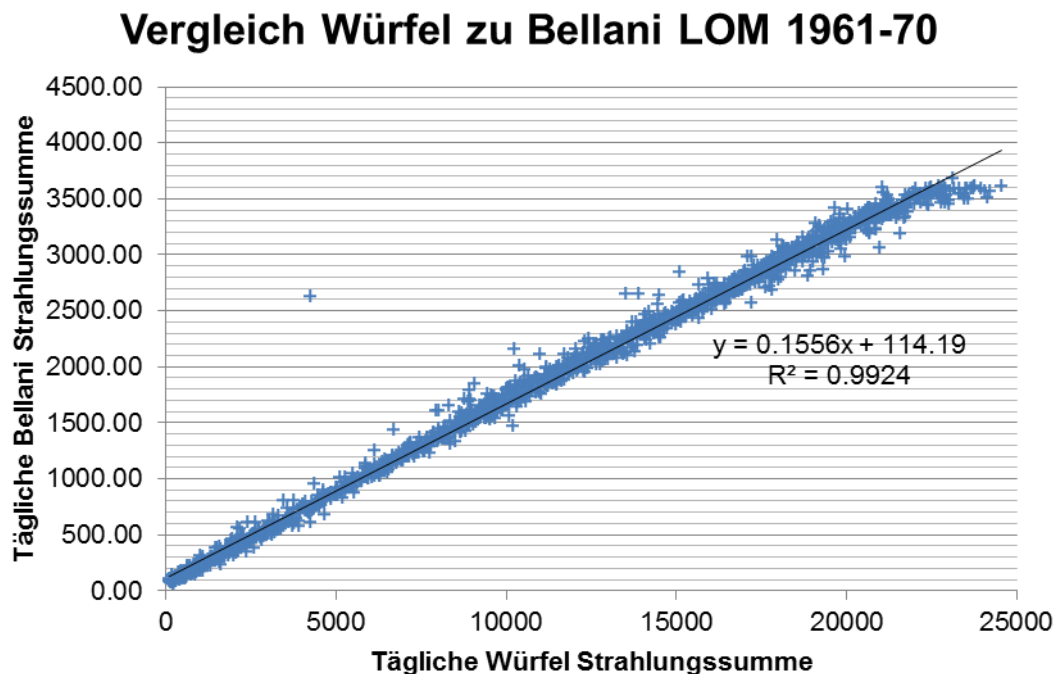
**Abbildung 19:** Aufstellung der vertikalen Pyranometer auf dem Dach in Locarno

---

Die Daten wurden von den originalen Papierstreifen digitalisiert und im DWH gespeichert. Leider fehlen bei zahlreichen Terminen die eine oder mehrere Messungen. Es ist uns nicht bekannt, inwieweit die digitalisierten Daten überprüft wurden. Für unsere Analyse wurden sämtliche verdächtige Termine nicht berücksichtigt.

Die Daten der ersten Dekade waren eher konsistent, hingegen in der zweiten von 1971-80 weniger. Wahrscheinlich machten später Instrumente oder Registriergeräte Probleme.

Wir analysierten deshalb nur die Daten vom 1.5.1961 bis 31.12.1970:



**Abbildung 20:** Vergleich der Tageswerte von ZGS und Strahlung auf einem bodenlosen Würfel in LOM in der Periode 1.5.1961 - 31.12.1970.

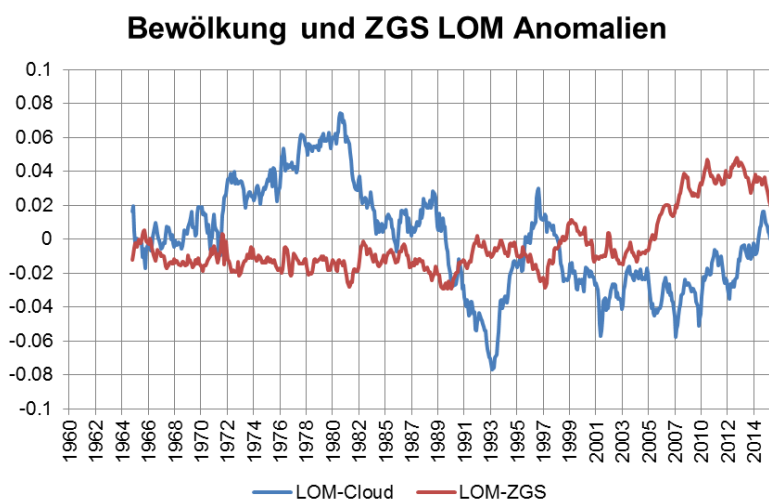
Die Übereinstimmung ist erstaunlich! Nur bei den grossen Summen merkt man auch hier die Abnahme der Empfindlichkeit der Bellani Kugelpyranometer (vgl. 2.2.4).

Ein solcher Vergleich mit den ersten Messdaten in Locarno wurde schon durch K. Schram (1967) vorgestellt. In dieser Veröffentlichung wurde deshalb betont, dass die Zirkumglobalstrahlung auch für die Schätzung des Strahlungsgenusses von Bauten gebraucht werden kann. Das wäre eine zusätzliche Anwendung neben dem üblichen Einsatz von Kugelpyranometer in der Land- und Forstwirtschaft.

### 4.3.3 Beobachtete Bewölkung (SYNOP)

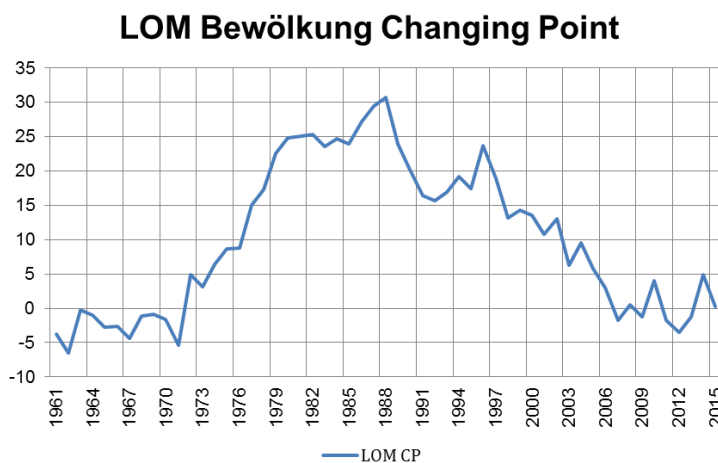
Um allfällige Einstrahlungsänderungen zu identifizieren und zu bestätigen, wurde auch die Gesamtbewölkung der SYNOP Beobachtungen untersucht. Nur die Daten von Locarno wurden analysiert, bei denen professionelle Beobachter eine Kontinuität und Homogenität sichern. Da nur Monatsmittelwerte der Bewölkung im DWH sind, wurde dieser Vergleich nicht zusammen mit den oben gebrauchten Tageswerten gemacht.

Das nächste Bild zeigt das gleitende jährliche Mittel der Monatswerte der Gesamtbewölkung in Locarno:



**Abbildung 21:** Vergleich der gleitenden Mittel der Monatswerte der Gesamtbewölkung und ZGS in LOM

Man erkennt eine Abnahme der Gesamtbewölkung im Trend. Es wurde auch hier die Pettitt „Changing Point“ Methode angewendet.



**Abbildung 22:** Changing Point der Monatswerte der Gesamtbewölkung in LOM

Aus unserer Auswertung sind folgende Beobachtungen interessant:

- Kein Trend in der 1960-1972 Periode
- Eine Zunahme von 1973-1988
- Eine tendenzielle Abnahme 1989-2006 mit einigen Variationen, aber sehr klar ab 2002
- Kein Trend von 2007-2015

Insbesondere die Trends ab ca. 2002 bestätigen die Ergebnisse bei der zirkumglobalen und globalen Strahlung, die früher gezeigt wurden, d.h. dass die Zunahme der gemessenen einfallenden Sonnenstrahlung wahrscheinlich teilweise auf eine Abnahme der Gesamtbewölkung zurückzuführen ist. Jedoch schwankt die Bewölkung bemerkenswert vor 1980, obschon die ZGS keine bemerklichen Änderungen zeigt.

Bei Sanchez-Lorenzo (2012) wurden die geschätzten Variationen der einfallenden HGS in der Schweiz analysiert und es wurden folgende Aussagen abgeleitet: Die Variationen der Strahlung durch die Bewölkungsänderungen und die Aerosolschwankungen können erklärt werden. Wild (2015) hat eine breitere Analyse der Variationen durchgeführt und im Wesentlichen ähnliche Schlüsse gefunden. Über die Rolle der Aerosole siehe auch Ruckstuhl (2008).

#### 4.4 Schneeauswirkung auf die Zirkumglobalstrahlung

Kontinuierliche langjährige Messungen der reflektierten Strahlung sind eher selten. Die Zirkumglobalstrahlung misst auch diese Strahlungskomponente und man kann die relative Auswirkungen des Schnees am Boden schätzen, wenn die anderen Komponenten (einfallende direkte und diffuse) ungefähr gleich sind und konstant gesetzt werden können.

##### 4.4.1 Schneeeffekt in Davos

In Davos ist der Boden während mehreren Monaten Schnee bedeckt. Für die Jahre 1964-1980 wurde folgender Verfahren angewendet:

- Es wurden nur Tage mit mindestens 95% relativer Sonnenscheindauer gebraucht.
- Folgende Perioden wurden jeweils gewählt:
  - Schnee frei: 12. August bis 25. Oktober (wenn Schnee war, wurden die Tage nicht berücksichtigt)
  - Schnee bedeckt: 12. Februar bis 30. April (wenn kein Schnee war, wurden die Tage nicht berücksichtigt)
- Für jeden Jahrestag wurde der Mittelwert der verbleibenden Tagessummen gebildet. Fragwürdige Werte (klare Ausreisser) wurden nicht berücksichtigt (man vermutet, dass die Dateien im DWH nicht vollständig überprüft worden sind).
- Um die Annahme von ähnlicher Direkt- und Diffusstrahlung zu erfüllen, wurden die Tage mit gleicher Sonnenbahn verglichen (z.B. Frühling und Herbst Equinox). Schaltjahren wurden nicht berücksichtigt, weil die Schwankungen viel kleiner als die anderen sind).
- Um die Daten ein wenig zu glätten, werden 5 Tage gleitendes Mittel in den folgenden Bildern dargestellt.

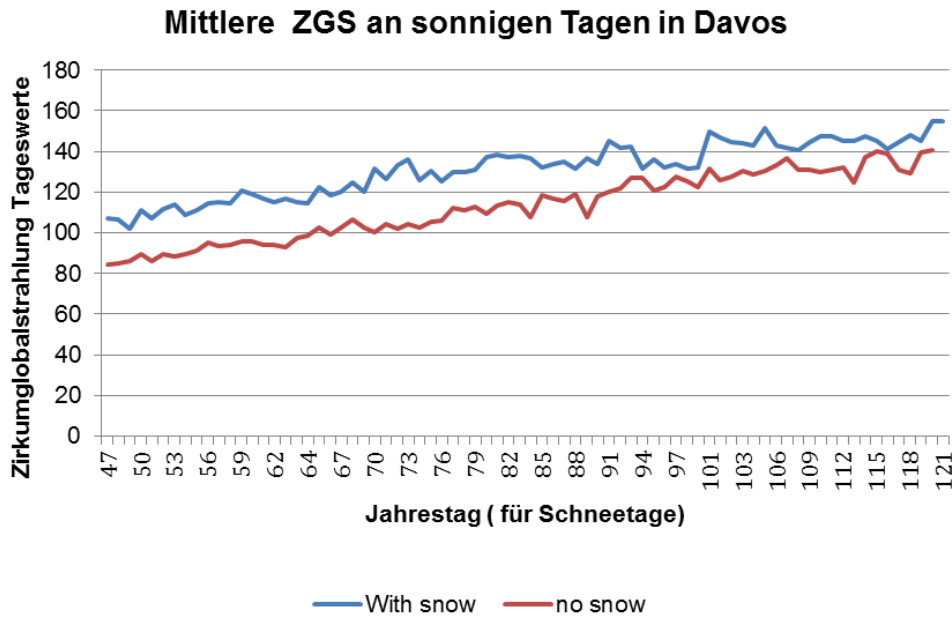


Abbildung 23: Vergleich der mittleren ZGS in DAV mit und ohne Schnee am Boden für vergleichbare sonnige Tage

Um die Unterschiede besser zu sehen, zeigt das nächste Bild das Verhältnis zwischen Zirkumglobalstrahlung an Tagen mit und ohne Schnee.

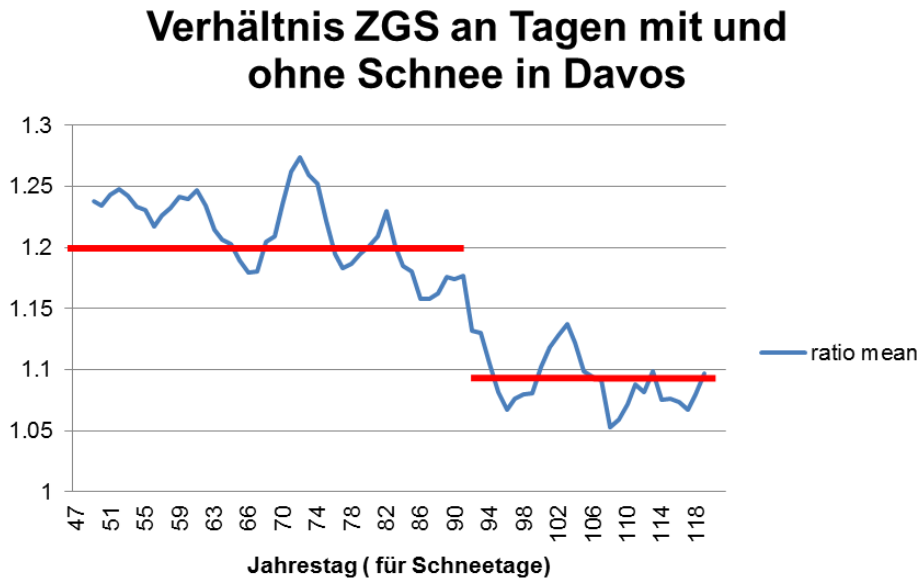


Abbildung 24: Verhältnis der ZGS mit und ohne Schnee am Boden nach Jahrestag an sonnigen Tagen in DAV

Man kann zwei „Perioden“ identifizieren: bis ca. Ende März liegt die zusätzliche Reflexstrahlung im Bereich von 20% der gesamten ZGS, danach um die Hälfte. Man kann folgende Erklärungen vermuten:

- In der ersten Periode sind die Schneefälle häufiger und die Schneeralbedo entsprechend höher. Später ist die Albedo von „Altschnee“ durchschnittlich tiefer.
- Die Station in Davos liegt in der Nähe des Talbodens, so dass ein Teil der Reflexstrahlung auch vom oberen Halbraum kommt. Im Frühling sind die Südhänge teilweise schon Schnee frei, obwohl am Boden an der Station noch Schnee gemessen wird. Die Reflexstrahlung nimmt daher entsprechend ab.

Auf Grund dieser Daten kann man keine genaue quantitativen Aussagen ableiten, weil keine Angaben über die verschiedenen Strahlungskomponente vorliegen. Doch können die Zirkumglobalstrahlungssummen für eine Schätzung des gesamten Albedo-Effektes benutzt werden.

#### 4.4.2 Schneeauswirkung in Locarno-Monti

In Locarno sind i.A. wenige Tage im Jahr mit Schnee am Boden bedeckt. Dieser kurze Exkurs befasst sich mit dem gemessenen Effekt der Albedo an spezifischen Tagen:

#### 13. April 1986

Der Tag war bewölkungsfrei mit relativer SSD = 99% und 15 cm Schnee am Boden bei der Morgenbeobachtung und am Abend nur noch 1 cm, also grösstenteils geschmolzen. Der folgende Tag, der 14.04.1986, hatte eine rel. SSD = 90% (nur am späten Nachmittag war eine Bewölkungszunahme) und kein Schnee mehr am Boden.

Hier die gemessenen Werte:

	HGS	ZGS	Relative SSD	Abs. SSD
13.04.1986	273	195.1	99%	12.3 Stunden
14.04.1986	264	142.9	90%	11.2
Verhältnis	1.034	1.365		

Der Unterschied in GHS zwischen 13.4.1986 und 14.4.1986 ist geringfügig (-3,4%). Dagegen wurde bei der Zirkumglobalstrahlung ein Unterschied von 36.5% gemessen. Der genaue ZGS Wert vom 13.4.86 ist mit Vorsicht zu geniessen: Der Beobachter notierte, dass die Ablesung abgeschätzt wurde, weil ein Überlauf beim PBK war. Das ist der grösste Beobachtungswert in der ganzen Messperiode!

Wenn die Änderungen der direkten und diffusen Strahlung vernachlässigt und die Unterschiede der ZGS nur auf die reflektierte Strahlung zurückgeführt werden, kann man die Albedo vom 13.04.1986 auf ca. 0.6 ableiten (wenn man 0.2 für schneefreien Boden setzt). Diese Gleichung wurde im Kapitel 4.3.1 angewendet.

### **6.März 2016**

Am Morgen wurden 22 cm Neuschnee gemessen und am Folgetag nochmals 12 cm. Die relative SSD war 98%, die ZGS 154.2 Whm-2 und HGS 199 Whm-2. Genau ein Jahr früher, d.h. am 6.3.2015, war ein sonniger Tag ohne Schnee; die relative SSD war 99%, die ZGS 123.2 Whm-2 und HGS 193 Whm-2. Wenn man die gleiche Rechnung anwendet, findet man ein Albedo von ca. 0.5 für den 6.3.2016.



## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Langjährige Messungen der Sonnenstrahlung sind besonders für klimatologische Untersuchungen wertvoll. Wenn die heutigen Messgeräte auch gute und stabile Werte liefern, so fehlen leider Messungen, die über Jahrzehnte mit denselben Instrumenten durchgeführt wurden.

Das Bellani Kugelpyranometer (PBK) bildet also eine wertvolle Ausnahme und liefert Messungen der wenig üblichen kurzwelligen Zirkumglobalstrahlung. In dieser Untersuchung wurde das Modell benutzt, das in Davos beim Physikalisch-Meteorologischen Observatorium in den 1940er Jahren entwickelt und hergestellt wurde. In Locarno und Basel wurden die Messungen 1954 angefangen und bis heute ohne Unterbrüche durchgeführt (in Basel fehlt der ganze Mai 1968). Weitere kürzere Messreihen liegen für Zürich und Davos vor.

In diesem Bericht wurde zuerst das PBK mit seiner Handhabung und Charakteristika beschrieben. Dann wurden die Daten mit folgenden Zielen näher untersucht:

- Datenkontrolle und -bereinigung, Lücken und Ausreisser ausfüllen/ersetzen (nur für Locarno)
- Untersuchung der Homogenität der Messreihen
- Vergleich der Zirkumglobalstrahlung zwischen den Standorten
- Vergleich mit anderen Strahlungsmessgeräten
- Untersuchung eines allfälligen klimatologischen Trends der Zirkumglobalstrahlung im Vergleich mit anderen Strahlungsgrössen
- Auswirkung des Schnees auf die Zirkumglobalstrahlung

In der Folge werden die wesentlichen Ergebnisse unserer Analysen zusammengefasst.

### ***Möglichkeiten und Grenzen des PBK Instrumentes:***

Das PBK liefert integrierte Tagessummen der ZGS in einer eher bescheidenen Auflösung (besonders für kleine Werte) und braucht eine manuelle Tagesablesung, aber keine zusätzliche Stromquelle oder Registriergeräte. Die ZGS ist eine lokale, bedingte Grösse. Für lange Messreihen muss also die Umgebung unverändert bleiben, um allfällige Trends der ZGS zu identifizieren.

Das PBK wurde besonders für Forschung in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt. Das PMOD hat über 700 Geräte gebaut und verkauft. Nach der Literatur wurde es hauptsächlich in den 1960-70 Jahre verbreitet. Später hat man kaum Publikationen gefunden. Wir vermuten, dass die BAS und LOM die weltweit längsten Messreihen sind.

Die Erfahrungen haben eine erstaunlich lange Stabilität des Instrumentes und eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen bewiesen (Vergleich unter verschiedenen Geräten).

Das PBK zeigt eine leichte Empfindlichkeitsabnahme bei grossen Strahlungssummen (in der Nähe der vollen Messskala). Diese wurde schon in der Literatur sowohl theoretisch als auch experimentell beschrieben und im Vergleich mit anderen Strahlungsgeräten in dieser Analyse gefunden.

**Homogenität der Messreihen Locarno:**

Die Messreihe war vollständig, doch wurde sie näher untersucht, um fragwürdige Daten mit verschiedenen Tests (Vergleich mit SSD, HGS und Tagesnotizen der Prognostiker) zu finden. Die Ersatzwerte wurden nach Bedarf mit Hilfsgrößen berechnet, um die Reihe zu vervollständigen.

Die langjährige Stabilität des PBK wurde mit Messungen an sonnigen Tagen und Parallelmessungen mit einem anderen Instrument verifiziert. Für Jahressummen und wahrscheinlich auch für Monatswerte ist die Locarno Reihe nach unseren Analyse über die ganze Messperiode homogen.

**Vergleich unter den Standorten der Zirkumglobalstrahlung:**

Es gibt eine gute Korrelation zwischen LOM und DAV, sowohl bei den absoluten Werten als auch in der Variation. Fragwürdig ist die DAV Abweichung in den letzten 3 Messjahren. Man erkennt systematisch tiefere Messungen in BAS und SMA als DAV/LOM, doch mit einem ähnlichen Ablauf.

Die Daten in SMA zeigen nach 1971 tiefere Werte als in BAS, wahrscheinlich durch eine Empfindlichkeitsabnahmen des Instrumentes verursacht.

**Vergleich mit anderen Strahlungsmessgeräten:**

Die Geometrie des PBK ist eindeutig anders als diejenige der üblichen HGS Pyranometer, so ist ein genauer Vergleich einzelner Tageswerte kaum möglich.

In Locarno misst eine SACRaM Station die direkte und diffuse Strahlung mit einer 1-Min Auflösung. Für 2015 wurden berechnete mit beobachteten ZGS Tagessummen unter folgenden Annahmen verglichen: Diffuse und reflektierte Strahlung seien isotrop und die Albedo um 0.2 konstant. Es wurde eine gute Übereinstimmung mit Korrelation von 0.96 gefunden. Die absoluten Jahreswerte des PBK liegen 5% tiefer als die Berechneten.

Zwischen 1960-80 wurden in Locarno vier Pyranometer vertikal aufgestellt, die in den 4 Himmelsrichtung schauten. Mit dem horizontalen Pyranometer hat man also die Strahlung auf einem Würfel ohne Grundfläche. In erster Näherung kann man ihn mit einer Kugel vergleichen. Es wurden nur „sichere“ Messungen als Vergleich verwendet (zahlreiche Lücken waren vorhanden). Die Korrelation zwischen PBK und „Würfel“ für eine 10-jährige Periode war 0.99! Man kann also daraus schliessen, dass ZGS Daten auch für die Schätzung der Strahlung an Bauten benutzt werden können.

**Klimatologische Trends der ZGS, im Vergleich zu SSD und HGS:**

Die MeteoSchweiz Sonnenscheindauer und horizontale Globalstrahlungs-Datenreihen wurden noch nicht homogenisiert. Vor 1980 wurde mit anderen Instrumenten als im ANETZ gemessen und später digitalisiert (in BAS war früher keine HGS vorhanden). In 2006 wurde der CM6 Pyranometer mit einem CM21 bei der Einführung des SwissMetNet ersetzt.

Für diese Analysen wurden 3 verschiedene Methoden angewendet: Zeitliche Anomalie Ablauf der 5-jährigen gleitenden Summen (Abweichung zum Mittelwert), Changing Point nach Pettitt, um den Zeitpunkt der Änderung zu finden, Änderung der Verteilung der Einzelwerte.

*Klimatologische Trends der ZGS:*

Für Locarno bis Ende des 20. Jahrhunderts ist kein besonderer Trend zu erkennen, dann eine rasche Zunahme, und anschliessend eine Stabilisierung um einen höheren Mittelwert.

Für BAS kann man eine ähnliche Entwicklung nach Ende der 90er Jahre feststellen, zusätzlich eine höhere Periode von ca. 10 Jahren ab 1985.

*Zeitpunkt der Änderung (Changing Point nach Pettitt):*

Eindeutig zu erkennen ist ein Zeitpunkt der Änderung in Richtung einer Zunahme, ab 2001 in LOM, und um ca. ein Jahr später in BAS. Die „Stabilisierung“ auf einem höheren Niveau der letzten 5 Jahre in LOM wird auch mit dieser Methode bestätigt.

*Vergleich von ZGS mit HGS und SSD:*

Für LOM zeigen die Abläufe der drei Variablen eine ähnliche Entwicklung ab ca. Mitte der 1980er Jahre. Vorher zeigte der ZGS Ablauf eindeutig „gedämpfte“ Schwankungen gegenüber den SSD und GSH Werten. Wir haben dafür keine Erklärung.

Für BAS zeigten ZGS und GHS eine bessere Übereinstimmung im Ablauf, wenn auch mit anderen absoluten Werten am Anfang.

*Verteilung der Einzelwerte:*

Hier wurden nur drei Perioden in den letzten 25 Jahren näher untersucht und zwar 1990-2000, 2001-2007, 2008-2015.

Für Locarno waren in der zweiten Periode weniger tiefe Tagessummen als in den anderen Messperiode, wo eine ähnliche Verteilung beobachtet wurde; bei den höheren Werten hingegen waren in den ersten zwei Perioden ähnliche Verteilungen, während die letzten Jahre häufiger höhere Daten zeigen. Diese sind wahrscheinlich auf häufigere sonnige Tage zurückzuführen, was auch bei der SSD der Fall war.

Für BAS waren die tieferen Werte in der ersten Periode häufiger als später; die grösseren Mittelwerte lassen sich in der dritten Periode mit häufigeren sonnigeren Tagen wie in Locarno erklären.

*Änderungen bei den einzelnen Monaten:*

In Locarno ist die Zunahme der ZGS zwischen Mai und September konzentriert. Im September maximal. Die Zunahme der ZGS ist in Basel ziemlich homogen und findet vor allem im März, April, Mitte August bis September statt. Die maximale Differenz findet im März statt.

***Vergleich mit den SYNOP Bewölkungs-Beobachtungen***

Bei den Bewölkungs-Beobachtungen in Locarno wurde eine tendenzielle Abnahme in der Periode 1989-2006 mit einigen Variationen festgestellt, aber sehr klar ab 2002, und kein Trend mehr ab 2007.

Insbesondere die Trends ab ca. 2002 bestätigen die Ergebnisse bei der zirkumglobalen und globalen Strahlung, die früher gezeigt wurde, d.h. die Zunahme der gemessenen einfallenden Sonnenstrahlung wahrscheinlich teilweise auf eine Abnahme der Gesamtbewölkung zurückzuführen ist.

Bei Sanchez-Lorenzo (2012) wurden die geschätzten Variationen der einfallenden HGS in der Schweiz analysiert und folgende Aussage abgeleitet: Die Variationen durch die Bewölkungsänderung und die Aerosol Schwankungen können erklärt werden.

***Schätzung der Albedo Zunahme bei Schnee am Boden mit den ZGS Messungen:***

Es wurden nur sonnige Tage benutzt. Für Locarno nur einzelne Tage, in DAV die Monaten mit Schnee am Boden. In DAV war die ZGS ca. 20% höher wegen der zusätzlichen Reflexstrahlung bei „Neuschnee“ und ca. 10% bei „Altschnee“. In Locarno hat man ein Albedo von 0.5 (im März) und 0.6 im April mit Schnee geschätzt.

**Schlusswort**

Diese Untersuchungen zeigen, dass die langjährigen Messungen der ZGS in Locarno und Basel mit dem Bellani Kugelpyranometer eine wertvolle Information über die Entwicklung des Strahlungsklimas an diesen Standorten liefern. Insbesondere zeigen diese Messreihen eine Zunahme der Strahlungssummen seit Anfang des 21. Jahrhunderts, was auch von anderen Autoren in Europa festgestellt worden ist.

Das Instrument hat eine erstaunlich gute Stabilität gezeigt, was für klimatologische Analysen notwendig ist. Der Vergleich mit anderen Strahlungsdaten hat i.A. eine gute Korrelation ergeben. Wir empfehlen deshalb diese weltweit längste Messreihe weiterzuführen.

## Abkürzungen

<b>PBK</b>	Pyranometer nach Bellani mit Kugelform
<b>LOM</b>	Locarno-Monti
<b>BAS</b>	Basel-Binningen
<b>SMA</b>	Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich
<b>DAV</b>	Davos
<b>ZGS</b>	Zirkumglobalstrahlung
<b>HGS</b>	Horizontale Globalstrahlung
<b>SSD</b>	Sonnenscheindauer (absolut)
<b>SSR</b>	Sonnenscheindauer (relativ)
<b>TMT</b>	Tagesmitteltemperatur
<b>SHM</b>	Schneehöhe am Morgen
<b>SHA</b>	Schneehöhe am Abend
<b>DWH</b>	DataWareHouse
<b>MCH</b>	MeteoSchweiz

## Literaturverzeichnis

---

**Ambrosetti, F., 1978:** Misure nel campo della radiazione solare a Locarno-Monti. Rapporti di lavoro dell'istituto svizzero di meteorologia MeteoSchweiz, Zürich (CH)

---

**Ambrosetti, F., 1971:** Radiazione globale su piani e radiazione circumglobale su sfera. Atti del congresso di Climatologia lacustre, Como (IT)

---

**Ambrosetti, F., 1978:** Strahlung, 1. Teil (Zirkumglobalstrahlung), Klimatologie der Schweiz, Heft 17/I

---

**Ambrosetti, F., P. Valko, 1980:** Strahlung, 2. Teil (Global- und Himmelstrahlung auf Horizontalfläche), Klimatologie der Schweiz, Heft 26/I

---

**Bellani, A., 1836:** Il collettore del calorico. Annali delle Scienze del Regno Lombardo-Veneto (IT), 200-208

---

**Bernier, P.Y., A.P. Plamondon, 1983:** Estimating net short-wave radiation with the Bellani Pyranometer, Agricultural Meteorology, 30 (1983) 175-184, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam (NL)

---

**Coulson, K.L., 1975:** Solar and Terrestrial Radiation Methods and Measurements, Academic Press, London (UK)

---

**Courvoisier, P., H. Wierzejewsky, 1954:** Das Kugelpyranometer Bellani. Beiträge zur Strahlungsmessmethodik V., Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Band 5, 413-446, Springer Verlag, Wien (AT)

---

**Defant, F., et al., 1973:** Geschichte der meteorologischen Strahlungsforschung. Promet, meteorologische Fortbildung, DWD, Offenbach (Main) (DE)

---

**Di Marco, L., 2014:** Klimatologische Analyse der Zirkumglobalstrahlung, gemessen mit dem Kugelpyranometer Bellani in Locarno-Monti im Zeitraum von 1.1.1961 bis 31.5.2014, MeteoSchweiz, Locarno-Monti, unveröffentlichter Bericht

---

**Di Marco, L., 2015:** Das Bellani Kugelpyranometer: Eine Strahlungsklimaanalyse in Locarno und Basel, Bachelorarbeit in Geowissenschaften, Universität Basel

---

**Hasterrath, S., 1963:** Strahlungsmessungen mit Bellani, Geofisica Pura e Applicata, Vol. 55, 1, 239-248

---

**Havlik, D., 1972:** Zur vertikalen Differenzierung der Zirkumglobalstrahlung, *Erdkunde*, Band 25, Heft 4, 241-251

---

**Heigel, K., 1961:** Die Zirkumglobalstrahlung auf dem Hohenpeissenberg, *Wetter und Leben*, Zeitschrift für praktische Bioklimatologie, Österreichische Gesellschaft für Meteorologie (AT)

---

**Mörikofer, W., 1962:** Zur Klimatologie der Zirkumglobalstrahlung, gemessen mit Kugelpyranometer. *Verhandlungen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft*, Scuol, 142, 69-71

---

**Pettitt, A., 1979:** A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Statistics* 28, 126-135

---

**Prohaska, F., 1947:** Das Kugelpyranometer Bellani: Ein einfaches Strahlungsmessgerät für biologische und ökologische Untersuchungen, *Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft*

---

**Ruckstuhl, C., et al., 2008:** Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12708, doi:10.1029/2008GL034228

---

**Sanchez-Lorenzo, A., M. et al., 2015:** Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9555–9569

---

**Schram, K., et al., 1967:** Die Bestimmung des Strahlungsgenuss von Bauten in verschiedenen Klimaten der Schweiz, *Schweiz. Blätter für Heizung und Lüftung*, Nr.1/1967

---

**Schüepp, W., 1960:** La conversion du rayonnement sphérique en rayonnement global, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, Band 10, 311-341

---

**Thams, J.C., et al., 1958:** Messungen der Zirkumglobalstrahlung am Alpensüdfuss, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, Band 9, 185-198

---

**Thams, J.C., 1960:** Über den Einfluss des Aufstellungsortes auf den Angaben des Kugelpyranometers Bellani, *Geofisica Pura e Applicata*, Vol. 45, 1, 303-310

---

**Thams, J.C., et al., 1962:** Die Grösse der diffusen Zirkumglobalstrahlung *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, Band 12, 47-63

---

**Veninza, P.E., 1963 :** The field performance of ten Bellani radiation integrators Canadian department of Forestry, Forest research branch, Contribution N. 524, Canada

---

**Wachter, H., 1968:** Häufigkeitsverteilung klimatologischer Größen (Temperatur, Wind, Niederschlag und Zirkumglobalstrahlung) am Beispiel von Frankfurt am Main und dessen näherer und weiterer Umgebung, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 107

---

**Wild, M., 2015:** Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming, *WIRES Clim Change*, 7, 91–107

---

**Wierzejewsky, H., 1962:** Ein neues integrierendes Messinstrument für Sonnen- und Himmelsstrahlung mi ebener Empfangsfläche *Verhandlungen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft*, Scuol, 142, 73-75

---

## Danksagung

Zuerst müssen wir allen Beobachtern für ihre täglichen Beobachtungen und Betreuung der Bellani Instrumenten über Jahrzehnten in Locarno und Basel Binnigen danken. Ohne diese wertvolle Fleissarbeit hätten wir diese Arbeit nicht durchführen können.

Rolf Philipona hat ein Review und wertvolle Kommentare geliefert. Franziska Keller hat nochmals die deutsche Sprache überprüft. Für die Formatierung danken wir Sara Salvi.



# Anhang

## Anhang 1: Kontrolle der Datengewinnung

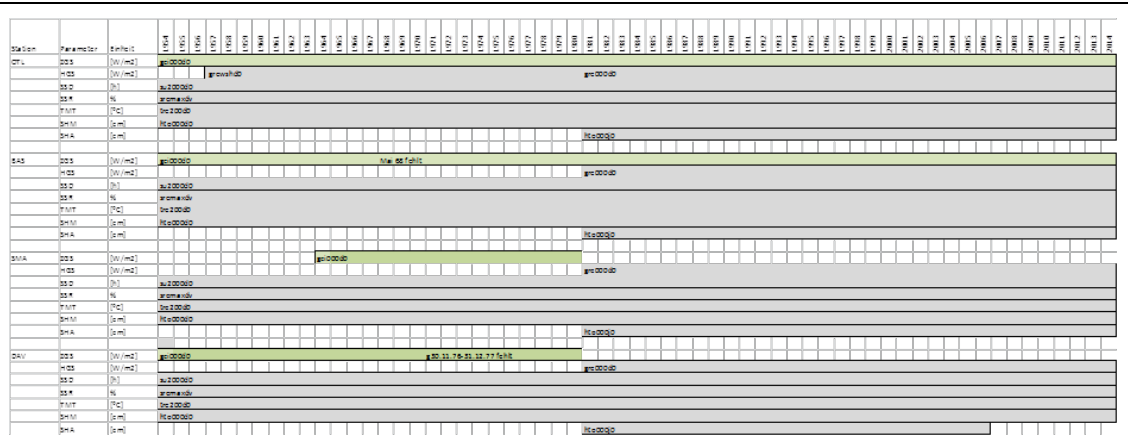


Abbildung 25: Übersichtsschema des Ursprungs der verschiedenen Daten; Angegeben sind die Kennungen der Variablen im DWH von Meteoschweiz.

## Anhang 2: Messinstrumente

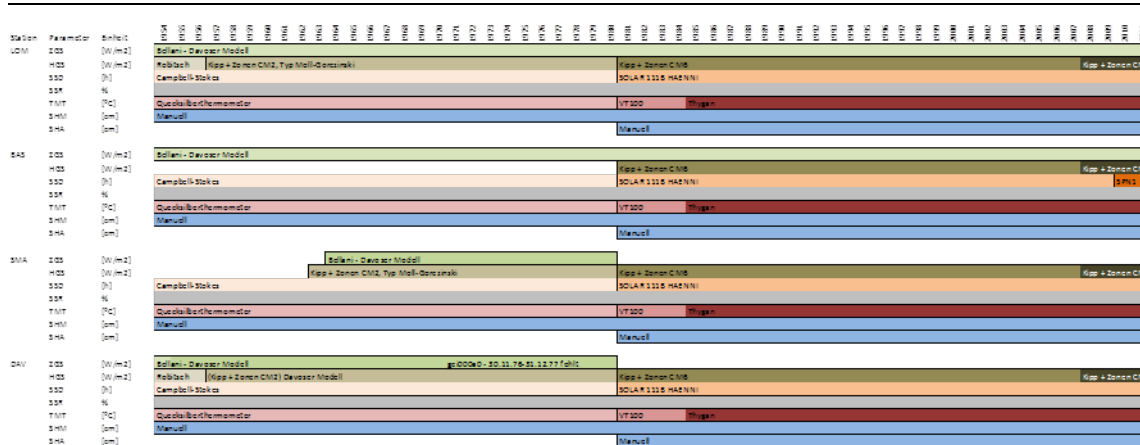


Abbildung 26: Übersichtsschema der während der ganzen Zeitreihe benutzten Messinstrumente

**MeteoSchweiz**  
Operation Center 1  
CH-8044 Zürich-Flughafen  
T +41 58 460 99 99  
[www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)

**MeteoSvizzera**  
Via ai Monti 146  
CH-6605 Locarno Monti  
T +41 58 460 97 77  
[www.meteosvizzera.ch](http://www.meteosvizzera.ch)

**MétéoSuisse**  
7bis, av. de la Paix  
CH-1211 Genève 2  
T +41 58 460 98 88  
[www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch)

**MétéoSuisse**  
Chemin de l'Aérogologie  
CH-1530 Payerne  
T +41 58 460 94 44  
[www.meteosuisse.ch](http://www.meteosuisse.ch)

