



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

**„Messdifferenz zwischen Radiosondensensoren,  
geschätzt aus Radiosondenvergleichsexperimenten  
und Reanalysen“**

verfasst von / submitted by

Thomas Rupnig, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
**Master of Science (MSc)**

Wien, 2020 / Vienna 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 614

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Meteorologie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Leopold Haimberger



# Inhaltsverzeichnis

Abstract . . . . .	3
Zusammenfassung . . . . .	3
<b>1. Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1. Problemstellung . . . . .	4
1.2. Zielsetzung und Forschungsfrage . . . . .	4
<b>2. Daten</b>	<b>6</b>
2.1. WMO-Vergleichsexperimente . . . . .	6
2.2. Background departures . . . . .	7
2.3. Reanalysen . . . . .	8
2.3.1. ERA5 . . . . .	8
2.3.2. JRA55 . . . . .	8
2.4. IGRA-Metadaten . . . . .	8
2.5. Weitere Vergleichsexperimente . . . . .	9
<b>3. Methoden</b>	<b>10</b>
3.1. Vergleichsexperimente . . . . .	10
3.2. Operationelle Radiosonden . . . . .	10
3.2.1. Vergleich an einer Station . . . . .	11
3.2.2. Regionaler Vergleich . . . . .	12
3.2.3. Standard Normal Homogenitätstest . . . . .	12
3.3. Entfernen von Ausreißern . . . . .	13
3.4. Unterscheidung Tag-/Nachtaufstieg . . . . .	13
3.5. Strahlungsfehler . . . . .	13
3.6. Druckkorrektur . . . . .	14
<b>4. Verwendete Radiosondentypen</b>	<b>16</b>
4.1. VAISALA RS80 . . . . .	16
4.2. GRAW M60 . . . . .	16
4.3. BRITAIN KEW MARK III . . . . .	16
4.4. USSR MARS . . . . .	16
4.5. AUSTRALIA PHILIPS MK III . . . . .	17
4.6. VIZ MK II . . . . .	17
4.7. CHINA GZZ . . . . .	17
4.8. JAPAN MEISEI RSII-80 . . . . .	17
4.9. USA SPACE DATA . . . . .	17
4.10. VIZ B 1492 . . . . .	18
4.11. KEW MARK II . . . . .	18
4.12. GRAW H50 . . . . .	18
<b>5. Ergebnisse</b>	<b>19</b>
5.1. Vergleich an einer Station . . . . .	20
5.1.1. GRAW M60 - VAISALA RS80 . . . . .	20
5.1.2. AUSTRALIA PHILIPS MK III - VAISALA RS80 . . . . .	21
5.1.3. BRITAIN KEW MARK III - VAISALA RS80 . . . . .	23

---

5.1.4. USSR MARS - VAISALA RS80 . . . . .	24
5.1.5. VIZ MK II - VAISALA RS80 . . . . .	25
5.1.6. USA SPACE DATA - VIZ B 1492 - VAISALA RS80 . . . . .	27
5.2. Regionaler Vergleich . . . . .	30
5.2.1. Bündelung . . . . .	30
5.2.2. USSR MARS - VAISALA RS80 . . . . .	32
5.2.3. GRAW M60 - VAISALA RS80 . . . . .	33
5.2.4. KEW MARK III - VAISALA RS80 . . . . .	34
5.2.5. JAPAN MEISEI RSII-80 - VAISALA RS80 . . . . .	35
5.2.6. CHINA GZZ - VAISALA RS80 . . . . .	37
5.3. Strahlungsfehler . . . . .	38
5.3.1. AUSTRALIA PHILIPS MK III . . . . .	38
5.3.2. KEW MARK III . . . . .	38
5.3.3. GRAW M60 . . . . .	39
5.3.4. VAISALA RS80 . . . . .	40
5.3.5. VIZ MK II . . . . .	40
5.3.6. USSR MARS . . . . .	41
5.3.7. JAPAN MEISEI RSII-80 . . . . .	42
5.3.8. CHINA GZZ . . . . .	42
5.3.9. USA SPACE DATA . . . . .	43
5.4. Druckkorrektur . . . . .	44
5.5. Weitere Vergleichsexperimente . . . . .	46
<b>6. Fazit und Ausblick</b>	<b>48</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>50</b>

## Abstract

Due to the change of instruments, inhomogenities can be found in radiosonde-data. Especially for the pre-satellite era, radiosonde-data is vital when it comes to climate analysis. Therefore, our data needs to be homogenized. To do so, we need to know the differences in measurements of the various radiosonde types. There have been experimental radiosonde comparisons before, where many different types of radiosondes were used. In this thesis the results of those comparisons should be reproduced with operational radiosonde data. There were two different approaches used to achieve this. First the change of instruments was used to compare two different radiosonde types. The time period before the change gets compared with the period after the change. Another approach was to compare different radiosonde stations with different radiosonde types in use. For this comparison, instead of observed temperatures, background departures were used. The ERA5 and the JRA55 re-analysis were used as the background.

Many of the experimental results could be confirmed with the use of operational data. Especially at the upper levels, the comparisons showed big differences in the mean background departures of some radiosonde types. One reason for this is the solar radiation error. This radiation error can be seen in both, the data of the experimental comparisons and the operational data. Also, the comparison showed that the mean background departures have a regional effect. The position of radiosonde stations is relevant even though we are using background departures.

## Zusammenfassung

Aufgrund des Wechsels von Messinstrumenten sind Radiosondendaten von Inhomogenitäten betroffen. Radiosondendaten sind für klimatologische Untersuchungen sehr wichtig. Vor allem für die Zeit, bevor es Satellitendaten gab. Daher ist es wichtig, dass die Radiosondendaten möglichst homogen sind. Für die Homogenisierung der Daten ist es wichtig, die Messdifferenzen der verschiedenen Instrumente zu kennen. Es gab bereits einige Vergleichsexperimente, in denen die verschiedenen Radiosondentypen verglichen wurden. In dieser Arbeit wird versucht, die durch solche Vergleichsexperimente gefundene Messdifferenzen zwischen den Radiosondentypen mittels Daten aus dem operationellen Betrieb zu replizieren. Hierzu wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. Zum einen wurden Radiosondenstationen betrachtet, bei denen der Radiosondentyp gewechselt wurde. Die Zeitspanne vor dem Wechsel wird mit der Zeitspanne nach dem Wechsel verglichen. Zum anderen wurden räumlich getrennte Radiosondenstationen, welche unterschiedliche Radiosondentypen einsetzen, verglichen. Für den Vergleich wurden nicht die beobachteten Temperaturen, sondern die Background departures herangezogen. Als Background wurden die ERA5 Reanalyse und die JRA55 Reanalyse verwendet.

Viele der experimentellen Ergebnisse konnten durch die Vergleiche repliziert werden. Die unterschiedlichen Radiosondentypen zeigten vor allem in den höheren Schichten ausgeprägte Unterschiede in den mittleren Background departures auf. Ein wichtiger Grund ist hierfür ein Strahlungsfehler, der bei vielen Radiosondentypen operationell und experimentell nachgewiesen werden konnte. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die mittleren Background departures häufig einen regionalen Effekt aufweisen. Trotz der Verwendung von Background departures ist die Örtlichkeit einer Radiosondenstation relevant.

# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Schon seit den 1930er-Jahren sind Radiosonden ein zentraler Bestandteil der Meteorologie. Heute ist ein ganzes Netzwerk aus Radiosonden für die Bestimmung verschiedener Parameter wie Temperatur und Feuchte in den höheren Schichten der Atmosphäre zuständig. Vor allem zu Zeiten, als es noch keine Satelliten Daten gab, waren Radiosonden-Daten essenziell und sind es für klimatologische Betrachtungen dieser Perioden auch heute noch.

Diese Radiosondendaten haben jedoch ein großes Problem. In vielen Zeitserien treten starke Inhomogenitäten auf. Wie so ziemlich alle klimatologischen Messreihen sind auch die Radiosonden Messreihen von Instrumentenwechsel betroffen. Schon zu Beginn wurden viele verschiedene Radiosondentypen parallel entwickelt. An den Messstationen werden diese Radiosondentypen häufig durch andere ersetzt, da sich bestimmte Radiosondensysteme mit der Zeit etablierten (wie z. B. die VAISALA RS80 Radiosonde) oder weil ein neueres und besseres System entwickelt wurde. Dieser Wechsel von Messinstrumenten sorgt, wie von Gaffen (1994) beschrieben, für Bruchpunkte in den Zeitreihen. Diese Diskontinuität in den Daten, welche vor allem in den höheren Schichten auftritt, wird in Sheerwood (2007) und Haimberger et al. (2008) diskutiert.

Von Onogi (2000) konnte ein Qualitätsunterschied in den Radiosondendaten sowohl im Verlauf der Zeit als auch im Tag/Nacht Vergleich festgestellt werden. Diese Inhomogenitäten müssen unbedingt vor klimatologischen Untersuchungen entfernt werden. Für Trendabschätzungen ist es sehr wichtig, dass die Datensätze zuvor homogenisiert wurden [Parker et al. (1997)]. Um diese Homogenisierung durchführen zu können, ist es wichtig zu wissen, wie unterschiedlich die Messergebnisse der verschiedenen Radiosondentypen sind. Um diese Frage zu beantworten, wurden bereits einige Vergleichsexperimente mit verschiedenen Radiosondentypen durchgeführt. Vor allem relevant sind die Vergleichsexperimente der World Meteorological Organization, welche in vier Phasen durchgeführt wurden [Nash and Schmidlin (1987), Schmidlin (1988), Ivanov et al. (1991), Yagi et al. (1996)].

Diese Arbeit befasst sich nun mit der Frage, wie gut oder schlecht diese verschiedenen Radiosondensysteme im Vergleich zueinander abschneiden. Hierzu werden die Daten bereits existierender Vergleichsexperimente und die verfügbaren operationellen Daten der Messstationen verwendet. Besonders wichtig ist hier die Frage, ob sich experimentelle Ergebnisse mit den operationellen Daten replizieren lassen. Für den operationellen Vergleich gibt es zwei verschiedene Ansätze. Einmal werden die Aufstiege unterschiedlicher, räumlich getrennter Stationen zur selben Zeit verglichen und einmal werden die Aufstiege an einer Station vor bzw. nach dem Wechsel des Radiosondentyps verglichen.

## 1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich verschiedener Radiosondensensoren. Verglichen werden vor allem die Temperaturmessungen der unterschiedlichen Radiosonden. Experimentelle Vergleiche von unterschiedlichen Radiosonden existieren bereits, jedoch fanden diese Vergleichsexperimente stets in einem möglichst kontrollierten Umfeld statt. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist, die in verschiedenen Vergleichsexperimenten gefundenen Unterschiede mit Daten operationeller Radiosonden und Reanalysen zu reproduzieren.

Die folgenden Forschungsfragen werden untersucht:

1. Ist es möglich, die Unterschiede der Vergleichsexperimente mit operationellen Daten zu reproduzieren?
2. Welchen Strahlungsfehler haben die verschiedenen Radiosonden im experimentellen sowie im operationellen Vergleich?
3. Welchen Einfluss hat eine Korrektur der Luftdruckmessung auf die Messergebnisse der Temperatur?

## 2. Daten

### 2.1 WMO-Vergleichsexperimente

Für den größten Teil der experimentellen Vergleiche wurden die Daten von Vergleichsexperimente der WMO, welche in vier Phasen zwischen 1984 und 1993 durchgeführt wurden, verwendet [Nash and Schmidlin (1987), Schmidlin (1988), Ivanov et al. (1991), Yagi et al. (1996)].

In Tabelle 1 sind die Details zu den vier Phasen der Vergleichsexperimente aufgelistet.

*Tabelle 1: Phasen der WMO-Vergleichsexperimente*

Phase	Datum	Ort	Radiosonden-Typen
Phase 1	20.06.1984 - 25.07.1984	Beaufort Park, UK (51.57N, 0.35W)	BRITAIN KEW MARK III VAISALA RS80 VIZ 1392 Graw G78C VIZ Beukers 1524
Phase 2	07.02.1985 - 13.03.1985	Wallops Island, USA (37.83N, 75.48W)	GRAW M60 VAISALA RS80 VIZ 1392 AUSTRALIA PHILIPS MK III INDIA MK III
Phase 3	07.08.1989 - 24.08.1989	Dzhambul, Kazakstan (42.85N, 71.38E)	AIR Intellisonde VAISALA RS80 VIZ 1392 USSR MRZ USSR MARS CHINA GZZ CHINA GTC1
Phase 4	17.02.1993 - 11.03.1993	Tsukuba, Japan (36.05N, 140.13E)	VIZ Mark-II VAISALA RS80 Japanese Meisei RSII-80 Japanese Meisei RSII-91 AIR Intellisonde

Die Daten der Aufstiege liegen in einfachen Textfiles vor. Pro Aufstieg und Typ gibt es ein eigenes File. Die einzelnen Aufstiege sind nummeriert. Einem weiteren File kann entnommen werden, welche Radiosondentypen bei welcher Aufstiegsnummer involviert waren.

Grundsätzlich wurden bei den Vergleichsexperimenten stets Tag- und Nachtaufstiege durchgeführt. Lediglich in der zweiten Phase wurden fast ausschließlich Tagaufstiege durchgeführt. Dieser Umstand wird später bei den Ergebnissen noch relevant.

## Versuchsablauf

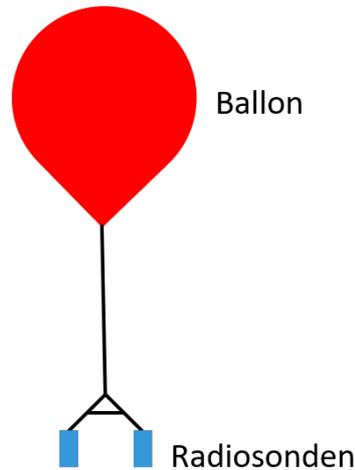


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau der WMO-Vergleichsexperimente

Bei den WMO-Vergleichsexperimenten wurden immer mehrere Radiosondentypen zeitgleich gestartet. Um die Beobachtungen der unterschiedlichen Radiosonden vergleichbar zu machen, wurden die Radiosonden an einem Gerüst befestigt. An dem Gerüst wurde ein Ballon befestigt. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die unterschiedlichen Radiosondentypen auch tatsächlich parallel aufsteigen und die selbe Luftmasse durchqueren. Durch das Gerüst können die Radiosonden zeitgleich und am selben Ort die Temperatur messen. An einem solchen Gerüst waren teilweise bis zu sieben verschiedene Radiosonden befestigt. Die Anzahl der gestarteten Radiosonden variierte jedoch von Aufstieg zu Aufstieg.

## 2.2 Background departures

Dieser Datensatz wurde von meinem Betreuer Univ.-Prof. Mag. Dr. Leopold Haimberger erstellt und mir zur Verfügung gestellt. Die Background departures werden gebildet, indem man eine Backgroundtemperatur von der beobachteten Temperatur abzieht. Wie die Background departures genau berechnet werden, wird im Abschnitt 3.2 besprochen. Als Background wird bei diesem Datensatz eine Reanalyse verwendet. Es gibt drei unterschiedliche Background departure variablen. Einmal mit der Reanalyse ERA5 als Background, einmal mit JRA55 und einmal mit ERA-Interim als Background. In dieser Arbeit werden die Background departures mit ERA5 und JRA55 als Background verwendet. Hier wird angenommen, dass diese Reanalysen das wahre Abbild des Atmosphärenzustandes darstellen. Der Sinn dahinter ist, dass man durch das Subtrahieren eines Backgrounds, Datenpunkte an unterschiedlichen Orten oder Datenpunkte zu unterschiedlichen Zeitpunkten vergleichbar macht. Wettereffekte und klimatische Unterschiede in verschiedenen Regionen sollen so bestmöglich entfernt werden.

Die Struktur des Datensatzes ist so, dass es für jede Station ein NetCDF-file gibt. In diesen Files sind die einzelnen Aufstiege an den Stationen mit Startzeitpunkt enthalten. Alle Aufstiege wurden einheitlich auf 16 Druckflächen zwischen 1000hPa und 10hPa gebracht. Eine etwas ausführlichere Beschreibung zur Theorie hinter dem Datensatz ist in Haimberger et al. (2012) zu finden.

## 2.3 Reanalysen

In diesem Abschnitt sind die beiden für die Background departures verwendeten Reanalysen ERA5 [Hersbach et al. (2020)] und JRA55 [Kobayashi et al. (2015)] kurz beschrieben.

Eine Reanalyse ist ein Datensatz, der den Zustand der Atmosphäre bereits vergangener Zeitpunkte beschreibt. Solche Datensätze werden durch Assimilation möglichst aller verfügbaren historischen Beobachtungsdaten und moderner Prognosemodellen errechnet. Es werden also historische Daten mit modernen Methoden neu interpretiert und in ein verwendbares Datenformat gebracht. Reanalysen sollen ein möglichst wahres Abbild des Atmosphärenzustandes zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellen.

### 2.3.1 ERA5

ERA5 ist die vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) produzierte Reanalyse. Sie ersetzt die ERA-Interim Reanalyse, welche seit August 2019 nicht weiter produziert wird. Die ERA5 Reanalyse deckt aktuell den Zeitraum 1979 bis jeweils 5 Tage vor dem heutigen Datum ab. Noch im Jahr 2020 soll die Reanalyse verlängert werden und bis 1950 zurückreichen. ERA5 hat eine horizontale Auflösung von 31km und verfügt über 137 vertikale Levels bis 0.01hPa. Außerdem hat die ERA5 Reanalyse eine stündliche Auflösung. Als Assimilationsverfahren wird 4D-Var verwendet.

### 2.3.2 JRA55

JRA55 ist die Reanalyse der Japanese Meteorological Agency (JMA). Sie deckt den Zeitraum 1958 bis heute ab. JRA55 hat eine horizontale Auflösung von 65km und verfügt über 60 vertikale Niveaus, die bis auf 0.1hPa reichen. Die zeitliche Auflösung ist 6-Stündig. Zur Assimilation wird auch hier das 4D-Var Schema verwendet.

## 2.4 IGRA-Metadaten

Als Informationsquelle, um herauszufinden, welche Radiosondentypen an welchen Stationen zu welchen Zeitpunkten im Einsatz waren, wurde das Integrated Global Radiosonde Archive, kurz IGRA verwendet [Durre et al. (2006)]. Im IGRA-Metadatenfile sind Einträge für 440 verschiedene Radiosondentypen.

Ein beispielhafter Auszug für die Station 11035 ist bei Abbildung 2 zu sehen. Angeführt sind die Stationsnummer, der Stationsname, Koordinaten, Datum, die Quelle der Information und welcher Typ zu diesem Zeitpunkt im Einsatz war bzw. ob zu diesem Datum auf einen neuen Radiosondentyp gewechselt wurde.

```
11035 WIEN/HOHE WARTE 48.2500 16.3700 200 1992 12 99 99 0 USING SONDE MODEL I1 AUSTRIA ELIN MODEL 2404 HYPSONETER Oakley (1993) & Hammer (pers. comm.)
11035 WIEN/HOHE WARTE 48.2486 16.3564 200 1996 07 22 99 0 CHANGE SONDE MODEL AUSTRIA ELIN Hammer (pers. comm.)
11035 WIEN/HOHE WARTE 48.2486 16.3564 200 1997 11 05 99 0 CHANGE SONDE MODEL VAISALA RS80 UNSPECIFIED to VAISALA RS80 UNSPECIFIED to VAISALA RS90-A NO NAVAJD Hammer (pers. comm.)
```

Abbildung 2: Auszug aus dem IGRA-Metadatenfile.

Die Informationen in diesem File sind aus verschiedenen Quellen zusammengetragen worden. Entsprechend gibt es häufig Informationslücken. Oft ist die genaue Typenbezeichnung der Radiosonde nicht bekannt, sondern lediglich der Hersteller. Ein weiteres Problem ist, dass meist nicht genau

bekannt ist, wann von Radiosondentyp A auf Typ B gewechselt wurde. Zumeist ist nur das Jahr bekannt und nicht der genaue Monat des Wechsels. Dementsprechend muss man die Informationen des IGRA-Files mit Vorsicht behandeln und man sollte so viele verfügbare Daten wie möglich verwenden, damit unerkannte Fehler das Ergebnis nicht verfälschen.

## **2.5 Weitere Vergleichsexperimente**

Es gibt seit einiger Zeit von der Universität Bern den Versuch, Radiosondenvergleichsexperimente in ein einheitliches Format zu bringen und diese über das Copernicus Programm der Europäischen Union zur Verfügung zu stellen. Mit diesem Datensatz sollen zukünftige Untersuchungen vereinfacht werden. Für diese Arbeit wurde mir eine Vorabversion der Daten zur Verfügung gestellt.

Dieser Datensatz ist besonders interessant, da er auch einzelnen Aufstiege von wesentlich älteren Vergleichsexperimenten enthält (Die ältesten Daten sind aus dem Jahr 1930). Häufig sind jedoch nicht die einzelnen Aufstiege der Vergleichsexperimente vorhanden, sondern nur die Ergebnisse aus den entsprechenden Arbeiten, welche aus den Experimenten resultierten. Für diese Arbeit können nur die Vergleichsexperimente verwendet werden, bei denen auch die einzelnen Aufstiege vorhanden sind, da bei den Ergebnissen anderer Untersuchungen natürlich andere Methoden verwendet wurden.

## 3. Methoden

### 3.1 Vergleichsexperimente

Bei den Vergleichsexperimenten starten immer mehrere Radiosonden zeitgleich am selben Ort. Es werden die Aufstiege gesucht, bei denen Typ A und Typ B zeitgleich aufgestiegen sind. Es wird die Differenz zwischen den beobachteten Temperaturen der beiden Typen auf den Druckflächen gebildet. Diese Differenz wird über alle gefundenen Aufstiege gemittelt. Das erhaltene Mittel entspricht dem Unterschied der beiden Radiosondentypen.

Die beobachtete Temperatur von Radiosondentyp A wird als  $T_A$  bezeichnet. Die von Typ B als  $T_B$

$$\overline{\Delta T_{A-B}} = \overline{T_A - T_B} \quad (1)$$

### 3.2 Operationelle Radiosonden

Für die Berechnung der Differenzen in den Temperaturmessungen der verschiedenen Radiosondentypen werden nicht die tatsächlich gemessenen Temperaturen verwendet, sondern die Background departures. Diese sind definiert als die beobachtete Temperatur minus der Backgroundtemperatur ( $\Delta \mathbf{T}_{\mathbf{o}-\mathbf{b}}$ ). Background departures haben ihren Ursprung in der Kostenfunktion [Barker et al. (2003)]. Hier bereits angewendet auf die Temperatur.

$$J(\mathbf{T}) = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{b}} - \mathbf{T})^T \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{b}} - \mathbf{T}) + \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{o}} - \mathbf{T})^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{o}} - \mathbf{T}) \quad (2)$$

Wobei  $\mathbf{T}_{\mathbf{b}}$  der Vektor des Backgrounds der Temperatur ist und  $\mathbf{T}_{\mathbf{o}}$  der Vektor der beobachteten Temperatur ist.  $\mathbf{B}$  ist die Kovarianzmatrix des Backgroundfehlers und  $\mathbf{R}$  ist die Kovarianzmatrix des Beobachtungsfehlers.

Für  $\mathbf{T}$  wird die Backgroundtemperatur  $\mathbf{T}_{\mathbf{b}}$  (Reanalyse) eingesetzt.

$$J(\mathbf{T}_{\mathbf{b}}) = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{o}} - \mathbf{T}_{\mathbf{b}})^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \underbrace{(\mathbf{T}_{\mathbf{o}} - \mathbf{T}_{\mathbf{b}})}_{\Delta \mathbf{T}_{\mathbf{o}-\mathbf{b}}} \quad (3)$$

Wobei  $\Delta \mathbf{T}_{\mathbf{o}-\mathbf{b}}$  die sogenannten Background departures sind. Die Background departures werden verwendet, um die Radiosondenaufstiege vergleichbar zu machen. Die Aufstiege finden entweder nicht zum selben Zeitpunkt oder nicht am selben Ort statt. Um die Wettereffekte zu einem konkreten Zeitpunkt bzw. die klimatologischen Unterschiede an zwei Orten auszugleichen, müssen die beobachteten Temperaturen von diesen Effekten bereinigt werden. Hier wird der Background als korrektes Abbild des Zustands der Atmosphäre behandelt. Als Background wurden hier die Reanalysen ERA5 und JRA55 verwendet.

### 3.2.1 Vergleich an einer Station

An den Stationen, wo Radiosondenaufstiege durchgeführt werden, werden hin und wieder die eingesetzten Radiosondentypen ausgewechselt. Dieser Wechsel kann für einen Vergleich verwendet werden. Solche Wechsel hinterlassen oft signifikante Bruchpunkte in den Zeitreihen. Exemplarisch sieht man dies in Abbildung 3.

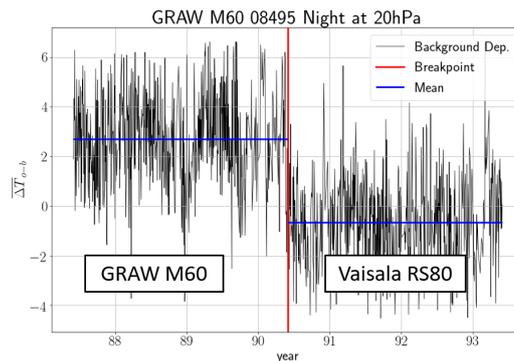


Abbildung 3: Beispiel für einen Bruchpunkt in einer Zeitserie aufgrund von Instrumentenwechsel. Der Bruch ist in den abgebildeten Background departures klar erkennbar. Vor dem Bruchpunkt (rote Linie) wurde die deutsche GRAW M60 Radiosonde verwendet. Danach die finnische VAISALA RS80.

Für den hier durchgeführten Vergleich werden einfach die Background departures der betrachteten Aufstiege vor dem Bruchpunkt gemittelt. Dieses Mittel wird von den mittleren Background departures nach dem Bruchpunkt abgezogen. Die erhaltene Differenz entspricht der Differenz der beiden Radiosondentypen.

Die mittleren Background departures zum Zeitpunkt  $t_2$  werden von den mittleren Background departures zum Zeitpunkt  $t_1$  abgezogen.

$$\overline{\Delta T_{o-b}^{t_1-t_2}} = \overline{\Delta T_{o-b}}(t_1) - \overline{\Delta T_{o-b}}(t_2) \quad (4)$$

Da für einen sinnvollen Vergleich die Datenmenge nicht zu gering werden darf, wurde als Bedingung festgelegt, dass die beiden Radiosondentypen für mindestens 3 Jahre durchgehend im Einsatz waren. An vielen Stationen wurden die Radiosondentypen häufig gewechselt. Diese Stationen wurden dementsprechend nicht betrachtet. Für den Vergleich wurden immer exakt 3 Jahre ausgewählt und nicht mehr, um nicht manche Stationen stärker als andere zu gewichten.

Der Zeitpunkt des Wechsels zu einem neuen Radiosondentyp kann dem IGRA-File entnommen werden. Oft sind diese Angaben jedoch nicht genau genug. Häufig wird lediglich das Jahr des Wechsels angeführt, jedoch nicht der konkrete Monat bzw. Tag.

Hier wird die Inhomogenität der Daten benützt, die bei einem solchen Wechsel auftritt. Der konkrete Bruchpunkt (Datum des Wechsels von Typ A auf Typ B) kann mithilfe eines Standard Normal Homogenitätstest (SNHT) ermittelt werden. Dieser ist unter Punkt 3.2.3 beschrieben.

### 3.2.2 Regionaler Vergleich

Beim regionalen Vergleich werden zwei Radiosondentypen an zwei verschiedenen Stationen verglichen. Die beiden Stationen sollten so nahe beieinander liegen wie möglich. Die beiden Radiosondentypen sollten auch zeitgleich im Einsatz gewesen sein, da sich auch ein Radiosondentyp im Verlauf der Zeit verändert. Der Vergleich soll durch solche Veränderungen nicht beeinflusst werden.

Bei diesem Vergleich werden alle Aufstiege an allen Stationen mit Radiosondentyp A und alle Aufstiege an allen Stationen mit Typ B gemittelt. Im Anschluss wird die Differenz der beiden Mittel gebildet.

Die Background departures an der Station  $i$  werden als  $\Delta T_{o-b}^i$  bezeichnet.

$$\overline{\Delta T_{o-b}^{i-j}} = \overline{\Delta T_{o-b}^i} - \overline{\Delta T_{o-b}^j} \quad (5)$$

Beim regionalen Vergleich tritt das Problem der Bündelung auf (zu finden im Abschnitt 5.2.1). Daher sollte diese Methode mit gewisser Vorsicht betrachtet werden.

### 3.2.3 Standard Normal Homogenitätstest

Ist der genaue Zeitpunkt des Wechsels von einem Radiosondentyp auf den anderen nicht bekannt, so wird die Inhomogenitätsstelle, die in den Daten durch den Wechsel hinterlassen wurde, mithilfe des Standard Normal Homogenitätstest (SNHT) Alexandersson (1986) gesucht. Der SNHT wird direkt auf die Background departures der Aufstiege angewandt.

Der SNHT wird auf eine Zeitreihe  $x$  mit der Länge  $n$  angewandt. Es wird für jede Stelle  $k$  der Zeitreihe die Teststatistik  $T_k$  berechnet. Der Bruchpunkt ist dort zu finden, wo die Teststatistik ihr Maximum annimmt.

$$T_k = [k \cdot (\mu_{1,k} - \mu)^2 + (n - k) \cdot (\mu_{k,n} - \mu)^2] / \sigma \quad (6)$$

mit

$$\mu_{1,k} = \frac{1}{k} \sum_k x_i \quad (7)$$

$$\mu_{k,n} = \frac{1}{n - k} \sum_{n-k} x_i \quad (8)$$

Der SNHT wird auf die Zeitreihe von jedem Druckniveau angewendet, da die Inhomogenität je nach Radiosondentypen auf unterschiedlichen Niveaus stärker zum Vorschein kommt.

Das Maximum der Teststatistik muss über 50 liegen, damit der Bruchpunkt als signifikant betrachtet wird. Aus den gefundenen Bruchpunkten auf jedem Druckniveau wird ein gewichtetes Mittel gebildet. Der gerundete Wert des Mittels ist der gesuchte Bruchpunkt.

$T_{k_i}$  ist die Teststatistik auf dem Drucklevel  $i$ .  $Breakpoint_i$  ist der Bruchpunkt auf dem Drucklevel  $i$ .

$$Breakpoint = \frac{1}{\sum_i \max(T_{k_i})} \sum_i [\max(T_{k_i}) \cdot Breakpoint_i] \quad (9)$$

### 3.3 Entfernen von Ausreißern

Zum Auffinden von Ausreißern wird der interquartile range (IQR) verwendet. Dieser ist definiert als die Differenz zwischen dem 75% und dem 25% Quantil.

$$IQR = Q_{0.75} - Q_{0.25} \quad (10)$$

Alle Werte über  $TOP$  und alle Werte unter  $BOTTOM$  werden als Ausreißer identifiziert und anschließend entfernt.

$$TOP = Q_{0.75} + IQR \quad (11)$$

$$BOTTOM = Q_{0.25} - IQR \quad (12)$$

Diese Methode der Identifizierung von Ausreißern wird auf alle verwendeten Datensätze angewandt.

### 3.4 Unterscheidung Tag-/Nachtaufstieg

Für die Untersuchungen werden die Radiosondenaufstiege stets nach Tag und Nachtaufstiege aufgeteilt. Hierzu wird mit dem Python-Paket `pysolar` der Sonnenstand in Grad berechnet.

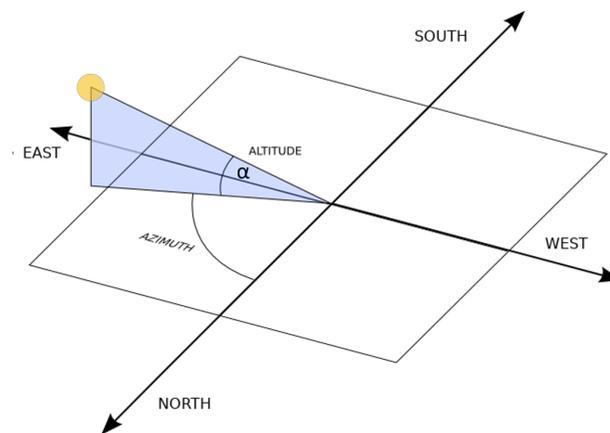


Abbildung 4: Ist der Winkel  $\alpha$  unter  $-10^\circ$ , so handelt es sich um einen Nachtaufstieg. Bei über  $10^\circ$  um einen Tagaufstieg. Bildquelle: Firing (2020)

Ist der Sonnenstand unter  $-10^\circ$ , so wird der Aufstieg als Nachtaufstieg erkannt. Ist der Sonnenstand über  $10^\circ$ , so wird der Aufstieg als Tagaufstieg gewertet.

### 3.5 Strahlungsfehler

Viele Radiosondentypen haben einen signifikanten Strahlungsfehler, der vor allem in den höheren Schichten zu großen Fehlern führt. Am Tag werden aufgrund der Strahlung wesentlich höhere Temperaturen gemessen als in der Nacht. Vor allem in den höheren Schichten sollte die gemessene Tem-

peratur am Tag jedoch ungefähr der Temperatur in der Nacht entsprechen. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für den Strahlungsfehler der USA SPACE Data Radiosonde.

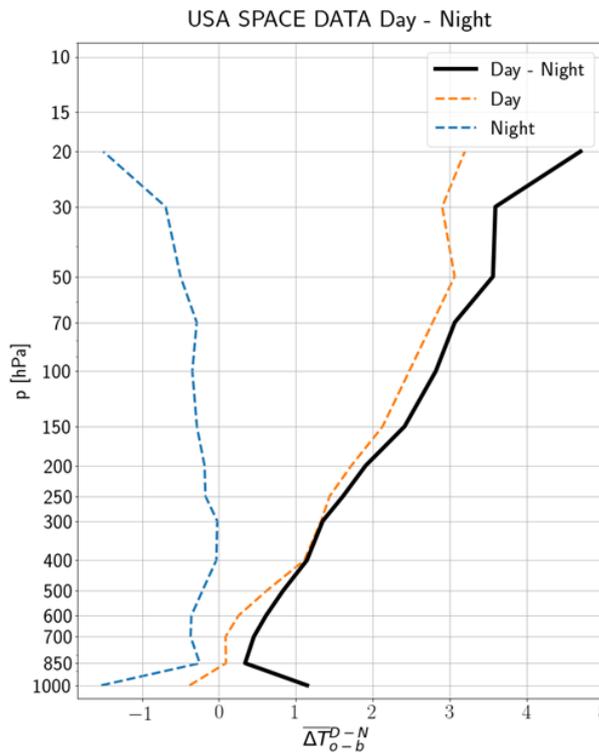


Abbildung 5: Beispiel für den Strahlungsfehler des Radiosondentyps USA SPACE DATA. Dargestellt wurden die Background departures mit ERA5 als Background. Es wird angenommen, dass der Background selbst keinen Strahlungsfehler hat. Hier sind die Daten mehrerer Station in Nordamerika zwischen 1989 und 1992 abgebildet. Man erkennt eine starke Abweichung in den Messergebnissen für Tag bzw. Nachtaufstiege.

Um den Strahlungsfehler von einem Radiosondentypen zu ermitteln, wird sowohl bei den operationellen Radiosonden als auch bei den Vergleichsexperimenten in Tag- und Nachtaufstiege unterschieden. Das Mittel der Nachtaufstiege wird von dem Mittel der Tagaufstiege abgezogen. Der einzige Unterschied ist, dass bei den operationellen Radiosonden wieder die Background departures verwendet werden und bei den Vergleichsexperimenten die tatsächlich beobachteten Temperaturen verwendet werden.

$$\overline{\Delta T_{day-night}} = \overline{T_{day}} - \overline{T_{night}} \quad (13)$$

Für die operationellen Daten sieht die Formel wie folgt aus.

$$\overline{\Delta T_{o-b}^{D-N}} = \overline{T_{o-b}^{Day}} - \overline{T_{o-b}^{Night}} \quad (14)$$

### 3.6 Druckkorrektur

Radiosonden melden die beobachteten Temperaturen immer auf konkreten Druckniveaus. Da der Drucksensor auch nicht frei von Fehlern ist, schleicht sich hier ein zusätzlicher Fehler bei der Tempe-

raturmessung ein. In manchen Vergleichsexperimenten wurden die beobachteten Temperaturen und der aktuelle Druckwert jede Minute gemeldet. Mit diesen Daten kann eine Druckkorrektur durchgeführt werden. Die Druckkorrektur ist nur mit den Vergleichsexperimenten möglich und kann nicht mit den operationellen Radiosonden durchgeführt werden.

Hier werden wieder Aufstiege gesucht, bei denen die zwei gesuchten Radiosondentypen zugleich aufgestiegen sind. Die Druck- und Temperatur-Minutenwerte des ersten Radiosondentypen werden unverändert verwendet. Die Temperaturwerte des zweiten Typs werden auf die Druckwerte des ersten Radiosondentypen interpoliert.

$$T_{b_{interp}} = [T_{b_i} \cdot (p_{a_i} - p_{b_{i+1}}) + T_{b_{i+1}} \cdot (p_{b_i} - p_{a_i})] / (T_{b_i} - T_{b_{i+1}}) \quad (15)$$

Dabei ist  $T_{b_i}$  die Temperatur des Radiosondentypen b zur Minute i ist.  $p_{b_i}$  ist der Druck von Typen b zur Minute i und so weiter.

Hier wurde die Temperatur von Typen b zwischen  $p_{b_i}$  und  $p_{b_{i+1}}$  auf das Druckniveau  $p_{a_i}$  interpoliert.

Danach wird die Differenz der beiden Radiosondentypen gebildet. Will man nun viele Aufstiege mitteilen, so ist das nicht einfach möglich, da Minutenwerte von Radiosonden nicht vergleichbar sind. Zwei Radiosonden, die an zwei unterschiedlichen Tagen starten, haben nach beispielsweise 60 Minuten ziemlich sicher nicht die exakt selbe Höhe erreicht. Um dennoch das Mittel über mehrere Aufstiege bilden zu können, muss jede Temperaturdifferenz eines gemeinsamen Aufstiegs der beiden Typen auf davor definierte Drucklevels interpoliert werden.

## 4. Verwendete Radiosondentypen

In diesem Abschnitt sind die verwendeten Radiosondentypen beschrieben. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass von den verschiedenen Radiosondentypen kaum Manuals zu finden sind. Viele der verwendeten Radiosondentypen sind schon sehr alt. Außerdem haben sich viele der Radiosondentypen auch im Verlauf der Zeit verändert. Das Messsystem wurde häufig angepasst. Es gibt zwar meist unterschiedliche Modellbezeichnungen, wenn ein Radiosondentyp weiterentwickelt wurde, jedoch kann man heute nicht mehr genau nachvollziehen, welches exakte Modell an einer Station im Einsatz war. Ein so genaue Unterscheidung ist also gar nicht möglich. Zu beschreiben, mit welchem Temperatursensor ein konkreter Radiosondentyp ausgestattet ist, würde hier den Rahmen sprengen und ist auch aufgrund der nicht vorhandenen Unterscheidungsmöglichkeit nicht zielführend. Aus diesem Grund sind die Radiosonden hier lediglich sporadisch und für einen groben Überblick beschrieben.

### 4.1 VAISALA RS80

Die RS80 Radiosonde des finnischen Herstellers Vaisala wurde im Jahre 1981 vorgestellt. Ab 1986 war dieser Radiosondentyp in Europa bereits stark verbreitet. Im Verlauf der 90er-Jahre verbreitete sich die RS80 Radiosonde auch in Afrika, Südamerika und vor allem in Australien. Zuletzt ersetzte sie auch einige der amerikanischen VIZ Radiosonden in Nordamerika. Die VAISALA RS80 Radiosonde war bis in die 2000er-Jahre im Einsatz und ist somit ein über sehr langen Zeitraum eingesetzter Typ. Da die Radiosonde auch global eingesetzt wurde, ist sie für den hier versuchten Vergleich ideal.

### 4.2 GRAW M60

Die deutsche GRAW M60 Radiosonde wurde in den frühen 60er-Jahren eingeführt. Stark genutzt wurde sie jedoch erst in den 1970er-Jahren, bis sie Ende der 80er-Jahre in den meisten Fällen durch die sich durchsetzende VAISALA RS80 ersetzt wurde. Die GRAW M60 Radiosonde war nahezu ausschließlich in Deutschland im Einsatz.

### 4.3 BRITAIN KEW MARK III

Die britische KEW MARK III Radiosonde wurde vom UK MET Office entwickelt. Dieser Radiosondentyp kam fast ausschließlich in Großbritannien zum Einsatz. Die KEW MARK III Radiosonde löste ihren Vorgänger KEW MARK II in den späten 70er-Jahren ab und war bis ca. 1990 im Einsatz. Auch die KEW MARK III Radiosonde wurde in der Regel durch die VAISALA RS80 Radiosonde ersetzt.

### 4.4 USSR MARS

Die russische MARS Radiosonde war vor allem in den Jahren 1983 bis 1989 im Einsatz. Sie war im gesamten russischen Staatsgebiet im Einsatz, aber auch in weiten Teilen Osteuropas. Die MARS Radiosonde wurde in Russland meist durch ihren Nachfolger, die USSR MRZ Radiosonde ersetzt. Außer-

halb von Russland wurde der Radiosondentyp wie die zuvor besprochenen Typen durch die VAISALA RS80 ersetzt.

#### **4.5 AUSTRALIA PHILIPS MK III**

Die australische PHILIPS MK III Radiosonde kam in den Jahren 1982 bis 1989 in Australien zum Einsatz. Auch dieser Radiosondentyp wurde in der Regel durch die VAISALA RS80 Radiosonde ersetzt. In Australien wurden im Zeitraum, als die PHILIPS MK III zum Einsatz kam, kaum Nachtaufstiege durchgeführt. Da dieser Radiosondentyp quasi ausschließlich dort zum Einsatz kam, ergibt sich hier eine besondere Problematik.

#### **4.6 VIZ MK II**

Die amerikanische VIZ MK II Radiosonde wurde vor allem in Nord- und Südamerika eingesetzt. Die ersten Stationen verwendeten diesen Typen bereits in den frühen 1990er-Jahren. In Südamerika hat dieser Radiosondentyp in den Jahren 1990 und 1991 bei einigen Stationen den finnischen Typen VAISALA RS80 abgelöst. Die VIZ MK II Radiosonde war teilweise bis 2004 im Einsatz.

#### **4.7 CHINA GZZ**

Dieser Radiosondentyp hat in China an den meisten Stationen den russischen Radiosondentypen USSR RZ-049 in den späten 60er bzw. frühen 70er-Jahren abgelöst. Die CHINA GZZ Radiosonde war dann zumindest bis in die späten 1990er-Jahre im Einsatz. Sie wurde danach von der CHINA GTS1 Radiosonde ersetzt. Mit diesem Radiosondentyp ergibt sich hier für einen Vergleich eine besondere Problematik. Die CHINA GZZ ist regional weit von den anderen verbreiteten Typen entfernt. Gleichzeitig waren nie andere relevante Typen an den chinesischen Stationen im Einsatz.

#### **4.8 JAPAN MEISEI RSII-80**

Dieser Radiosondentyp kam von Mitte der 1980er-Jahre bis Mitte der 1990er-Jahre zum Einsatz und wurde an den meisten Stationen durch den nachfolgenden Radiosondentyp JAPAN MEISEI RSII-91 ersetzt. Der japanische Radiosondentyp kam stets ausschließlich in Japan zum Einsatz.

#### **4.9 USA SPACE DATA**

Die USA SPACE DATA Radiosonde kam fast ausschließlich in Nordamerika zum Einsatz. Sie löste an vielen Stationen in den späten 1980er-Jahren die sich zu diesem Zeitpunkt immer stärker etablierende VAISALA RS80 Radiosonde ab. Bereits Mitte der 90er-Jahre wurde die SPACE DATA an vielen Stationen durch die VIZ B 1492 Radiosonde ersetzt.

#### **4.10 VIZ B 1492**

Wie bereits oben erwähnt, löste die VIZ B 1492 Radiosonde die USA SPACE DATA an vielen Stationen in Nordamerika ab. Jedoch war die VIZ B 1492 schon ab den späten 80er-Jahren im Einsatz. Auch dieser Radiosondentyp war nur einige Jahre im Einsatz und wurde noch Mitte der 90er-Jahren an den meisten Stationen durch ihren Nachfolger, die VIZ B2 1492 oder durch die finnische Radiosonde VAISALA RS80 ersetzt.

#### **4.11 KEW MARK II**

Wie der Name dieser Radiosonde bereits verrät, war die KEW MARK II Radiosonde der Vorläufer der KEW MARK III. Zumeist kam der Typ in Großbritannien zum Einsatz und wurde in den späten 70er-Jahren von der KEW MARK III abgelöst. Eingeführt wurde dieser Radiosondentyp bereits in den 40er-Jahren und war seit dem für bis zu 30 Jahre durchgehend im Einsatz.

#### **4.12 GRAW H50**

Die GRAW H50 Radiosonde war spätestens ab 1960 im Einsatz. Es ist wahrscheinlich, dass sie auch schon früher zum Einsatz kam. Mitte der 1960er-Jahre wurde sie von der GRAW M60 Radiosonde abgelöst. Wie schon die GRAW M60 kam auch die GRAW H50 Radiosonde fast ausschließlich in Deutschland zum Einsatz.

## 5. Ergebnisse

Bei den jetzt folgenden Vergleichen wurde der Radiosondentyp VAISALA RS80 als Referenzradiosonde für möglichst alle Vergleiche verwendet. Dieser Radiosondentyp war weit verbreitet und eignet sich daher besonders gut für den Vergleich mit den operationellen Daten.

Eine wichtige Anmerkung ist noch, dass viele interessante Radiosondentypen hier nicht betrachtet wurden, obwohl sie Teil der Vergleichsexperimente waren. Das liegt daran, dass oft die notwendige Datengrundlage für einen vernünftigen Vergleich im operationellen Bereich nicht verfügbar war. Viele Radiosondentypen kamen nur über sehr kurze Zeiträume zum Einsatz oder wurden nur bei wenigen Stationen eingesetzt. Oft gibt es auch im IGRA-Metadatenfile gewisse Unsicherheiten, welcher Radiosondentyp genau im Einsatz war. Solche Stationen können nicht berücksichtigt werden, was die Datendichte bei manchen Radiosondentypen weiter reduziert hat.

Die Plots der Ergebnisse sind für alle Radiosondentypen dieselben. Im linken Teil des Plots sind die schwarzen Linien die errechnete mittlere Differenz aus den experimentellen Daten. In Blau sind die mittleren Unterschiede der operationellen Daten mit ERA5 als Background und die Orangen sind die mittleren Unterschiede der operationellen Daten mit JRA55 als Background. Die hellgrauen Linien im Hintergrund sind die mittleren Differenzen der einzelnen Stationen mit ERA5 als Background (ERA5 Member).

Das Balkendiagramm auf der rechten Seite zeigt, wie viele Datenpunkte bei den experimentellen Daten auf jedem Druckniveau verfügbar waren. In den höheren Schichten sind häufig nur noch wenige Datenpunkte vorhanden, da nur wenige Radiosonden entsprechende Höhen erreichen. Diesen Werten sollte entsprechend nicht unbedingt vertraut werden.

## 5.1 Vergleich an einer Station

### 5.1.1 GRAW M60 - VAISALA RS80

Die Karte in Abbildung 6 zeigt die verwendeten Stationen für diesen Vergleich. Für den Vergleich wurden die Stationen ausgewählt, bei denen der Radiosondentyp GRAW M60 durch die finnische Radiosonde VAISALA RS80 ersetzt wurde. Die betrachteten Stationen befinden sich fast alle in Deutschland. Die einzige Ausnahme ist die Station in Gibraltar im Süden der iberischen Halbinsel. Die Wechsel von der deutschen Radiosonde GRAW M60 auf den Typen VAISALA RS80 fand bei allen Stationen im Zeitraum Mai 1990 bis Dezember 1990 statt.

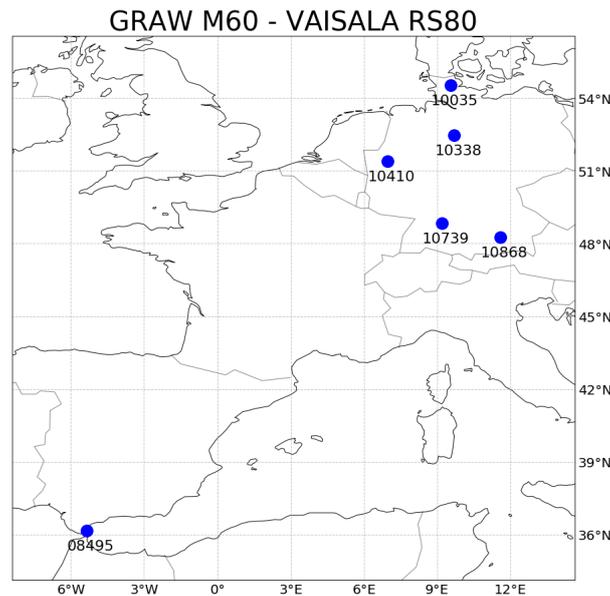


Abbildung 6: Verwendete Stationen für den Vergleich GRAW M60 - VAISALA RS80. An allen Stationen wurde der GRAW M60 Radiosondentyp im Zeitraum Mai 1990 - Dezember 1990 von der VAISALA RS80 Sonde ersetzt.

Für diesen Vergleich ist eine Vorbemerkung zu den Nachtaufstiegen notwendig. Wie bereits zuvor erwähnt, wurden in der zweiten Phase der WMO-Vergleichsexperimente fast ausschließlich Aufstiege am Tag durchgeführt. Um einen experimentellen Vergleich mit der GRAW M60 Radiosonde zu ermöglichen, wurde die Obergrenze für einen als Nachtaufstieg definierten Aufstieg auf einen Sonnenstand von  $0^\circ$  angepasst. Trotz dieser Anpassung ist die Datendichte noch immer sehr gering.

Die mittleren operationellen und die mittleren experimentellen Aufstiege sehen sehr ähnlich aus. Die Ergebnisse der experimentellen Aufstiege ließen sich hier näherungsweise replizieren. Bis ca 100hPa gibt es für den Nacht-Vergleich quasi keine Abweichung zwischen den operationellen und experimentellen Ergebnissen. Ganz allgemein wurden bis in dieser Höhe in der Nacht kaum Abweichungen zwischen den beiden Radiosondentypen festgestellt. Erst darüber waren vor allem die mittleren Background departures der GRAW M60 Radiosonde negativer als die der VAISALA RS80. Über 100hPa nahm auch die Abweichung zwischen den operationellen und experimentellen Ergebnissen zu. Hier muss aber erwähnt werden, dass für den experimentellen Nachtvergleich in dieser Höhe nur sehr wenige Datenpunkte zur Verfügung standen.

Beim Tag-Vergleich sind die Abweichungen zwischen experimentell und operationell etwas größer. Qualitativ sind jedoch die Ergebnisse am Tag und in der Nacht dieselben. Für den Vergleich am Tag standen wesentlich mehr experimentelle Daten zur Verfügung.

Erst in höheren Schichten wird die Abweichung größer. Die Abweichungen sind am Tag und in der Nacht vorhanden und in der Nacht größer. Daher kann ein Strahlungsfehler nicht dafür verantwortlich sein.

Die Streuung der in Gl. 5 definierten Backgrounddeparture-Differenzen ist sehr gering. Das liegt wohl unter anderem an der räumlichen Nähe der Stationen (abgesehen von der Station in Gibraltar).

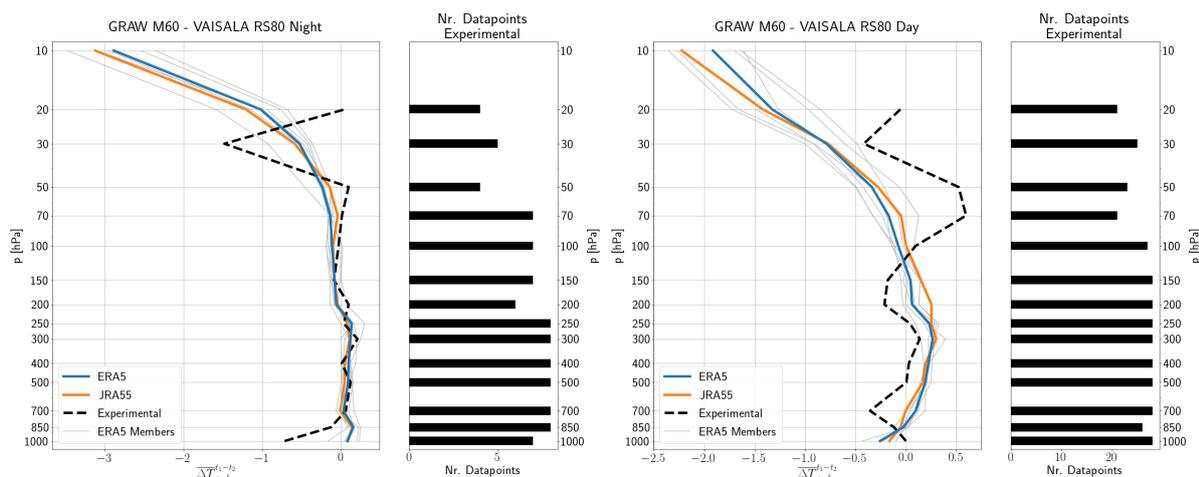


Abbildung 7: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der GRAW M60 Radiosonde und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $0^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

### 5.1.2 AUSTRALIA PHILIPS MK III - VAISALA RS80

In Abbildung 8 sind erneut die verwendeten Stationen für den folgenden Vergleich abgebildet. Hier wurden australische Stationen verwendet, bei denen die AUSTRALIA PHILIPS MK III Radiosonde durch die VAISALA RS80 ersetzt wurde. Der Wechsel von dem australischen Typen auf die VAISLA Radiosonde fand bei allen Stationen zwischen 1987 und 1989 statt.

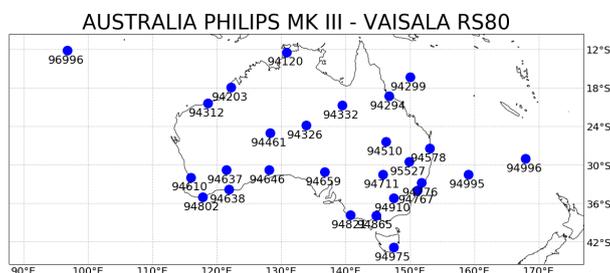


Abbildung 8: Für den Vergleich AUSTRALIA PHILIPS MK III - VAISALA RS80 verwendete Stationen. Der Wechsel von der australischen Radiosonde auf die finnische fand bei diesen Stationen von 1987 bis 1989 statt.

Wie schon zuvor muss auch hier angemerkt werden, dass die Obergrenze für die Definition eines Nachtaufstiegs von  $-10^\circ$  auf  $0^\circ$  angepasst wurde. Die AUSTRALIA PHILIPS MK III Radiosonde war

ebenfalls Teil der zweiten Phase der WMO-Vergleichsexperimente. Die Obergrenze musste angepasst werden, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Bei nur sehr wenigen der australischen Stationen wurden im betrachteten Zeitraum Nachtaufstiege durchgeführt. Die Anpassung der Obergrenze für Nachtaufstiege ist also auch für die Datendichte der operationellen Daten zuträglich. Entsprechend der dennoch sehr geringen Datendichte sieht das Ergebnis für die Nacht-Radiosonden sehr unruhig aus. Die Streuung bei den Backgrounddeparture-Differenzen ist in der Nacht sehr groß. Dennoch ist die Abweichung zwischen den operationellen und den experimentellen Ergebnissen nicht allzu groß und bewegt sich im Bereich von einigen zehntel °C. Die Abweichung zwischen den beiden Radiosondentypen ist sowohl im experimentellen als auch mit operationellen Vergleich sehr gering. Die wirklich hohen Niveaus wurden nur sehr selten erreicht, was eine Aussage über Unterschiede dort nicht möglich macht.

Bei dem Vergleich der Tagaufstiege standen wesentlich mehr Daten zu Verfügung. Hier sind die operationellen und experimentellen Ergebnisse bis ca. 50hPa nahezu identisch. Hier konnten die experimentellen Ergebnisse sehr gut repliziert werden. Vor allem bei den operationellen Daten nahm darüber die Datendichte rapide ab. Dort variieren die Ergebnisse auch stärker. Aus dem experimentellen Ergebnis lässt sich feststellen, dass in den hohen Schichten die australische Radiosonde wesentlich höhere Temperaturen misst als die finnische. Die Ursache dafür könnte der Strahlungsfehler der australischen Radiosonde sein. Die Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen ist bei dem Vergleich am Tag wesentlich geringer. Auch hier spielt die räumliche Nähe der Stationen wohl eine gewisse Rolle, auch wenn die Distanzen zwischen den Stationen doch wesentlich größer ist als zuvor beim Vergleich der GRAW M60 Radiosonde.

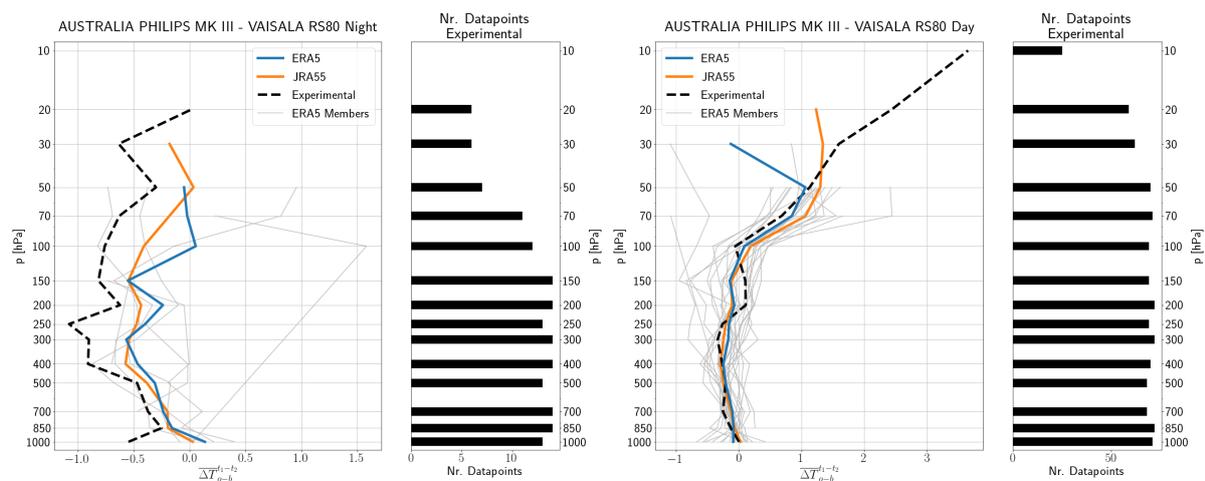


Abbildung 9: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen dem Radiosondentyp AUSTRALIA PHILIPS MK III und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $0^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

### 5.1.3 BRITAIN KEW MARK III - VAISALA RS80

Die britischen KEW MARK III Radiosonden wurden an den betrachteten Stationen im Jahr 1990 durch die VAISALA RS80 Radiosonde ersetzt. Die meisten der Wechsel fanden im März und April 1990 statt. Die betrachteten Stationen befinden sich alle in Großbritannien und in Küstennähe.

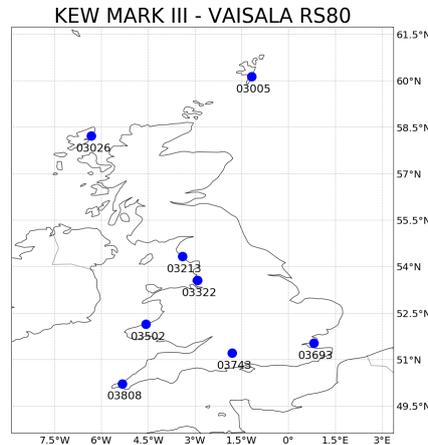


Abbildung 10: Hier sind die verwendeten Stationen für den KEW MARK III - VAISALA RS80 Vergleich abgebildet. Der Wechsel vom britischen Radiosondentyp auf die VAISALA RS80 Radiosonde fand an allen Stationen im Jahr 1990 statt.

Die experimentellen Ergebnisse ließen sich, wie man in Abbildung 11 erkennen kann, sehr gut replizieren. Sowohl bei dem Vergleich am Tag als auch beim Vergleich in der Nacht war die Abweichung zwischen dem experimentellen Ergebnis und den operationellen Ergebnissen im Bereich von wenigen zehntel °C. Erst auf der 10hPa Schicht variieren die Ergebnisse der Vergleiche mit JRA55 und ERA5 als Background. Nur wenige Radiosonden erreichten diese Höhe, was für eine geringe Datendichte sorgt. Außerdem sind auch diese Unterschiede meist unter 0.2°C. Allgemein ist auch die Abweichung zwischen den Radiosondentypen in allen Vergleichen sehr klein. Die Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen ist ebenfalls sowohl am Tag als auch in der Nacht sehr gering.

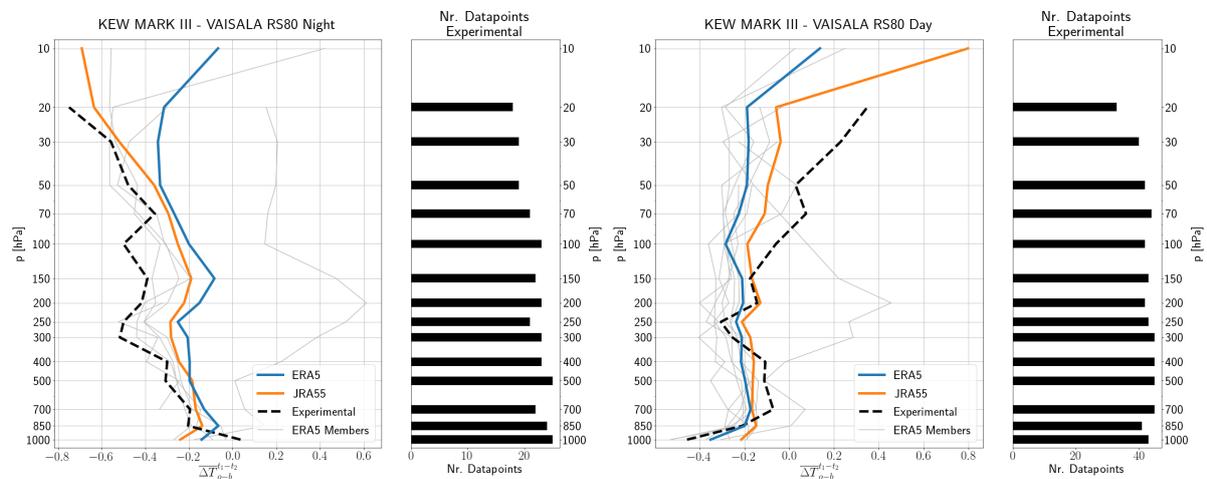


Abbildung 11: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der KEW MARK III und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase I.

### 5.1.4 USSR MARS - VAISALA RS80

Bei den betrachteten Stationen aus Abbildung 12 wurde von der russischen Radiosonde USSR MARS im Zeitraum von 1989 bis 1994 auf die finnische Radiosonde VAISALA RS80 gewechselt. Der Zeitraum ist recht groß. Jedoch standen nicht viele Stationen zur Verfügung, bei denen auf die VAISALA Radiosonde gewechselt wurde. Daher musste dieser Kompromiss getroffen werden. Die verwendeten Stationen befinden sich großteils in Osteuropa und nicht in Russland.

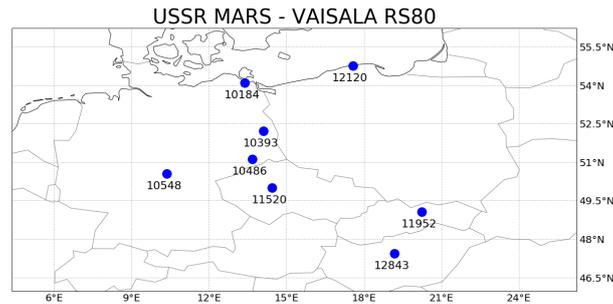


Abbildung 12: Hier sind die verwendeten Stationen für den Vergleich zwischen der USSR MARS Radiosonde und der VAISALA RS80 Radiosonde. Der Wechsel von der russischen Radiosonde auf die finnische fand in den Jahren zwischen 1989 und 1994 statt.

Als Erstes fällt auf, dass die Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen sowohl in der Nacht als auch am Tag sehr groß ist. Eine Erklärung dürfte der große betrachtete Zeitraum sein. Es werden teilweise Radiosondenaufstiege unterschiedlicher Stationen aus verschiedenen Jahren miteinander verglichen. Auch die experimentellen Ergebnisse sind sehr unruhig. Für den experimentellen Vergleich standen nur sehr wenige Daten zur Verfügung. Vor allem in Bodennähe weisen die experimentellen Daten eine starke Differenz auf. Warum die MARS Radiosonde in diesen Schichten eine höhere Temperatur misst, wurde auch von Ivanov et al. (1991) nicht endgültig geklärt, jedoch wurde vermutet, dass die Software Oktava zur Verarbeitung der Messdaten Fehler verursacht hat. Allgemein konnten hier die experimentellen Ergebnisse nur sehr grob durch die operationellen Daten repliziert werden.

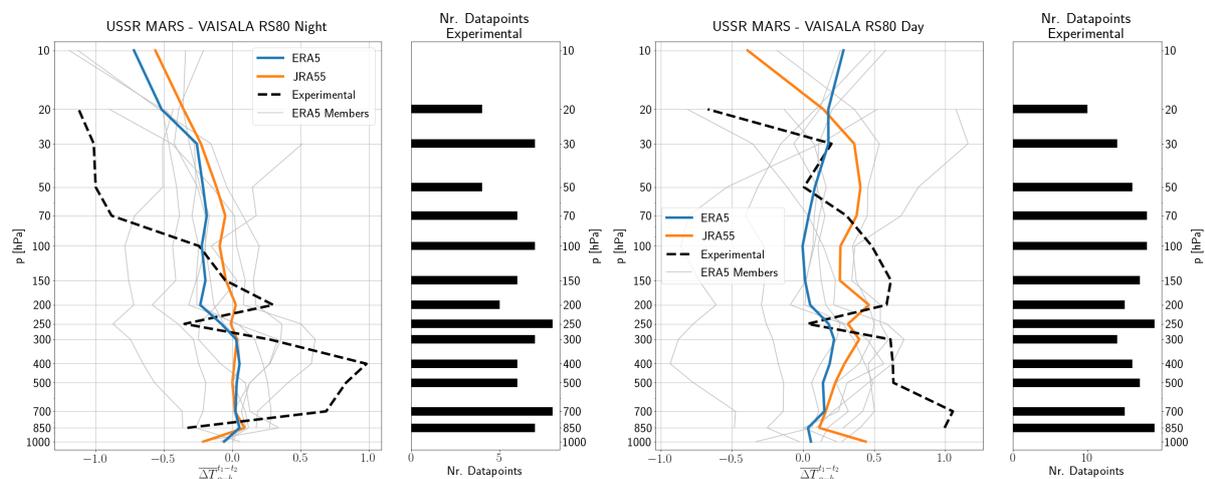


Abbildung 13: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der USSR MARS und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase III.

### 5.1.5 VIZ MK II - VAISALA RS80

Bei der VIZ MK II Radiosonde haben wir die Situation, dass zwei verschiedene Varianten bei den Vergleichsexperimenten verwendet wurden. Hier kommt ein Problem auf. Aus den operationellen Daten geht nicht hervor, welcher Thermistor genau im Einsatz war. Die Radiosonden sind im IGRA-File lediglich als VIZ MK II gekennzeichnet. Hier wurde ein Vergleich mit beiden Varianten (großer und kleiner Thermistor) durchgeführt. Als operationelle Daten wurden in beiden Fällen dieselben Stationen und Zeiträume verwendet. Der Vergleich wurde hier mit beiden Varianten aus den experimentellen Daten durchgeführt.

Bei den betrachteten Stationen wurde in den Jahren 1990 und 1991 von dem Typen VAISALA RS80 auf die amerikanische Radiosonde VIZ MK II gewechselt. Die Stationen befinden sich alle in Südamerika.

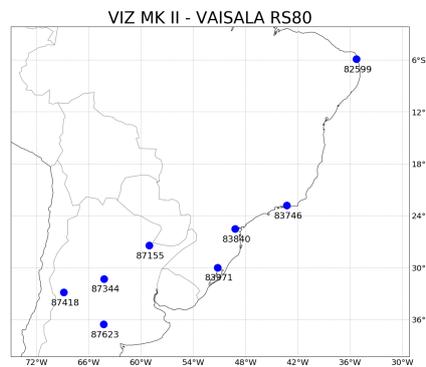


Abbildung 14: Hier sind die verwendeten Stationen für den VIZ MK II - VAISALA RS80 Vergleich abgebildet. An diesen Stationen wurde die VAISALA RS80 Radiosonde in den Jahren 1990 und 1991 durch den amerikanischen Radiosondentyp VIZ MK II ersetzt.

### Großer Thermistor

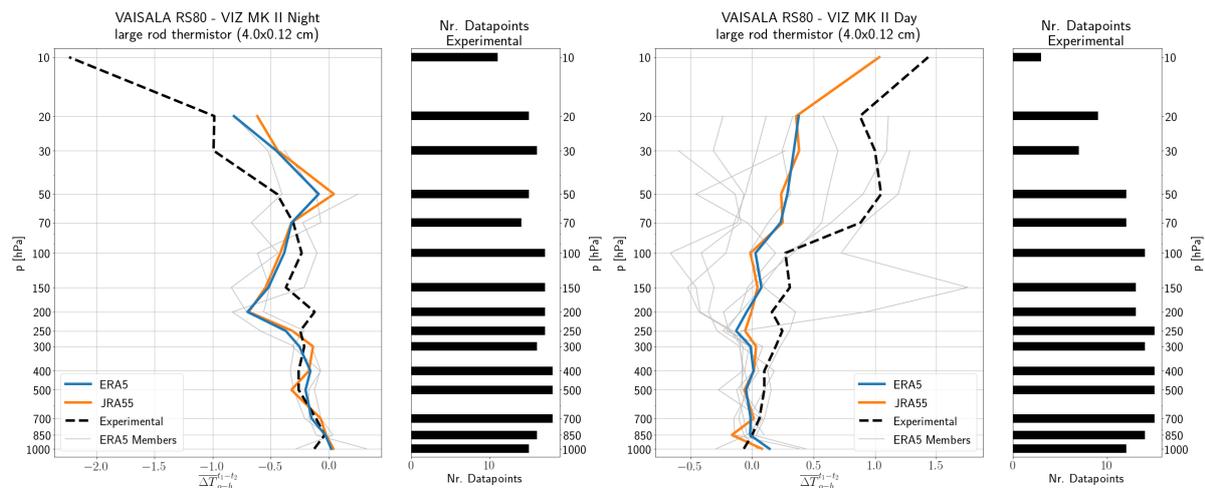


Abbildung 15: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der VIZ MK II und der VAISALA RS80 Radiosonde. Für die experimentellen Daten wurde hier die Ausführung der VIZ Radiosonde mit dem großen Thermistor verwendet. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase IV.

Vor allem bei den Nachtaufstiegen konnte das experimentelle Ergebnis recht gut repliziert werden. Hier fällt auf, dass beim Nachtvergleich weniger ERA5-Members eingezeichnet sind. Das liegt daran, dass an einigen Stationen keine Nachtaufstiege im betrachteten Zeitraum durchgeführt wurden. Die Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen ist in der Nacht sehr gering. Am Tag ist die Streuung etwas größer. Generell ist die Abweichung zwischen experimentellen und operationellen Ergebnissen am Tag größer als in der Nacht.

### Kleiner Thermistor

In der Nacht sieht man beim kleinen Thermistor quasi keinen Unterschied. Der kleine Thermistor scheint in der Nacht nicht schlechter abzuschneiden. Am Tag fällt auf, dass die Abweichung in der Höhe größer ist. Man kann also davon ausgehen, dass der kleine Thermistor einen wesentlich höheren Strahlungsfehler im Vergleich zum großen hat. Grundsätzlich ist das experimentelle Ergebnis des großen Thermistors tagsüber näher an den operationellen Ergebnissen. Es scheint die Schlussfolgerung logisch, dass die variante mit dem großen Thermistor in der betrachteten Region häufiger eingesetzt wurde.

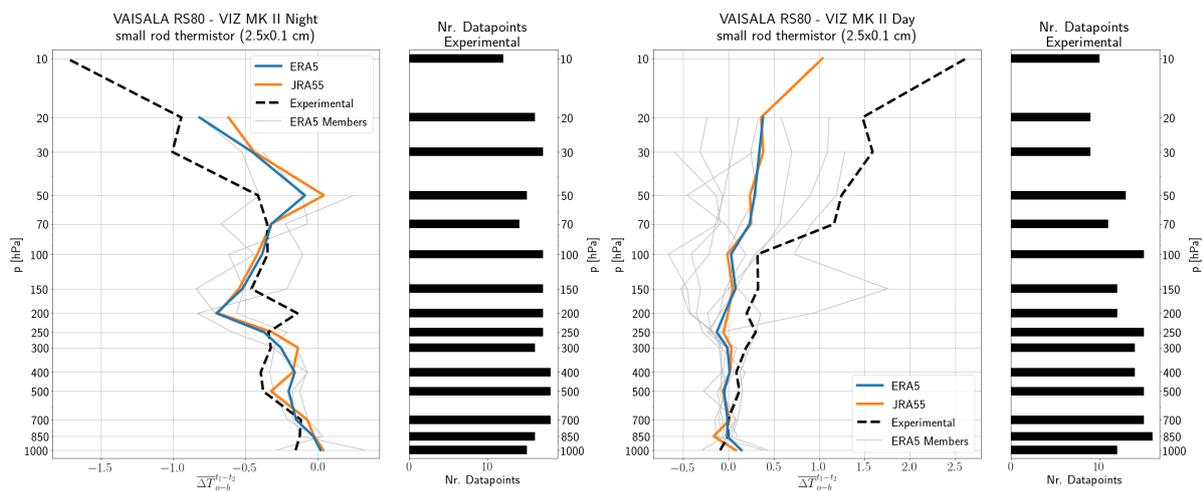


Abbildung 16: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der VIZ MK II und der VAISALA RS80 Radiosonde. Für die experimentellen Daten wurde hier die Ausführung der VIZ Radiosonde mit dem kleinen Thermistor verwendet. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase IV.

### 5.1.6 USA SPACE DATA - VIZ B 1492 - VAISALA RS80

Zu diesem Vergleich gibt es keine experimentellen Daten. Es ist aber dennoch ein interessanter Vergleich, da die USA SPACE DATA Radiosonde direkt mit der VAISALA RS80 verglichen werden konnte, aber auch indirekt über die VIZ B 1492. Außerdem sind die USA SPACE DATA und die VIZ B 1492 häufig eingesetzte Radiosondentypen, die in den Vergleichsexperimenten nicht berücksichtigt wurden.

Hier beginnen wir mit dem USA SPACE DATA - VAISALA RS80 Vergleich. Die betrachteten Stationen befinden sich alle in den USA. Jedoch aber recht weit voneinander entfernt, da sich die halben Stationen in Alaska und die andere Hälfte an der Grenze zu Mexiko befinden. Die Wechsel von der USA SPACE DATA Radiosonde auf die VAISALA RS80 fand zwischen 1989 und 1992 statt.

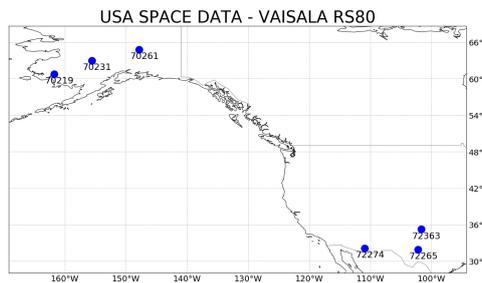


Abbildung 17: Verwendete Stationen für den Vergleich zwischen der USA SPACE DATA Radiosonde und der VAISALA RS80 Radiosonde. Der Wechsel zur VAISALA Radiosonde findet in den Jahren 1989 bis 1992 statt.

Beim Nachtvergleich ist die Streuung bei Backgrounddeparture-Differenzen recht groß. Das könnte mit der räumlichen Trennung der verwendeten Stationen zusammenhängen. Die Abweichung zwischen den beiden Typen ist in der Nacht im Grunde aber nicht sehr groß. Anders sieht das Bild am Tag aus. Die USA SPACE DATA Radiosonde weist viel höhere Werte auf. Das weist auf einen ausgeprägten Strahlungsfehler hin.

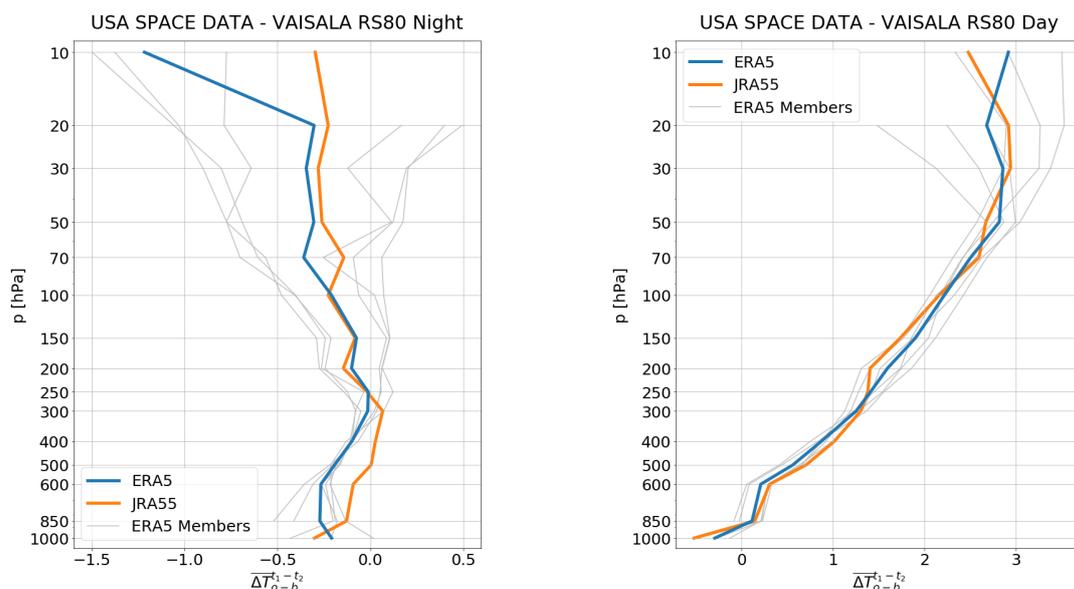


Abbildung 18: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{0-b}$  zwischen der USA SPACE DATA und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ).

Die Summe der Ergebnisse der beiden Abbildungen 19 und 20 jeweils für die Tag und Nachtaufstiege sollte näherungsweise die den Ergebnissen aus Abbildung 18 entsprechen. Für die Tagvergleiche ist dies sehr gut gegeben. Auf 20hPa beträgt die Abweichung zwischen USA SPACE DATA und VAISALA RS80 rund  $3^{\circ}\text{C}$ . Die Abweichung zwischen USA SPACE DATA und VIZ B 1492 beträgt auf diesem Niveau rund  $2^{\circ}\text{C}$  und die Abweichung zwischen VIZ B 1492 und VAISALA RS80 beträgt ca.  $1^{\circ}\text{C}$ . In der Nacht funktionierte dies unter Berücksichtigung der Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen in den mittleren Schichten auch recht gut. Ansonsten ist eine Aussage recht schwierig, da die Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen vor allem am Boden und in den hohen Schichten beim USA SPACE DATA - VIZ B 1492 Vergleich recht groß ist.

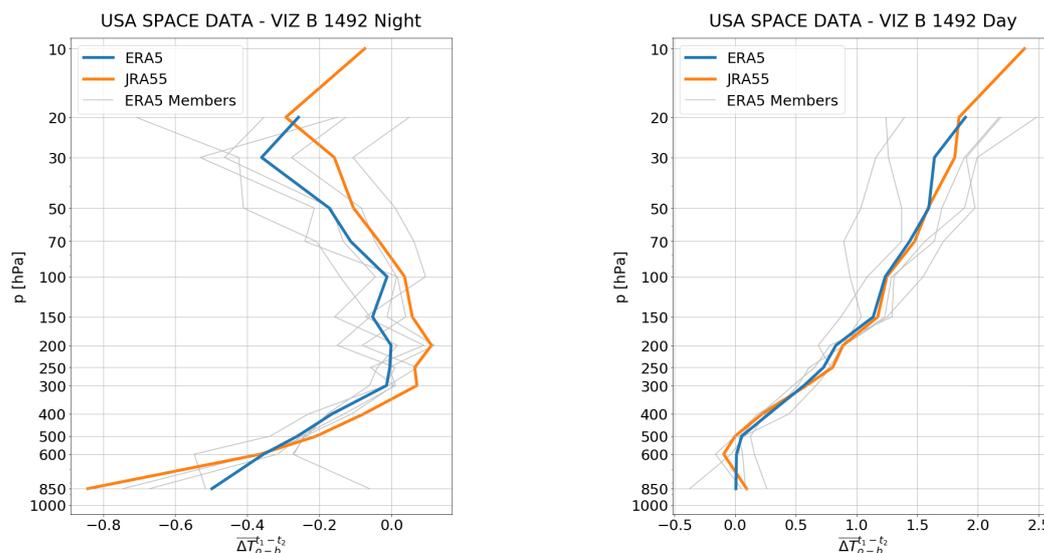


Abbildung 19: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der USA SPACE DATA und der Amerikanischen VIZ B 1492 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^{\circ}$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^{\circ}$ ).

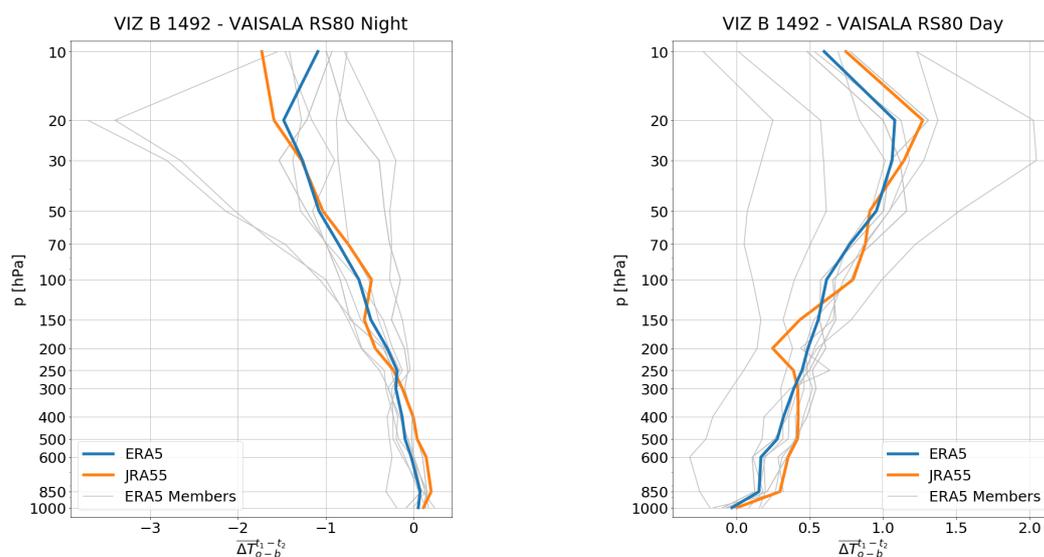


Abbildung 20: Mittlere Abweichung der Background departures  $\Delta T_{o-b}$  zwischen der VIZ B 1492 und der VAISALA RS80 Radiosonde. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^{\circ}$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^{\circ}$ ).

In Abbildung 21 sind die verwendeten Radiosonden für den USA SPACE DATA - VIZ B 1492 Vergleich abgebildet. Der Wechsel von USA SPACE DATA auf VIZ B 1492 fand in den Jahren 1994 und 1995 statt. Die Stationen befinden sich ebenfalls alle in den USA.

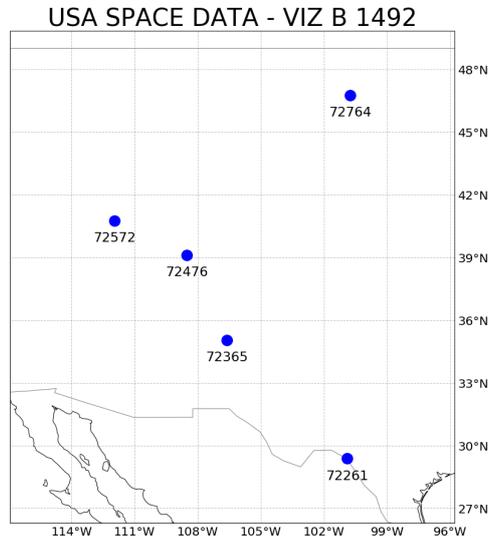


Abbildung 21: Hier sind die verwendeten Stationen für den Vergleich zwischen der USA SPACE DATA und der VIZ B 1492 Radiosonde dargestellt. Der Wechsel von der SPACE DATA auf die VIZ B 1492 fand in den Jahren 1994 und 1995 statt.

Die Stationen für den letzten Vergleich befinden sich nahezu alle in Alaska und Kanada. Der Wechsel von der VIZ B 1492 Radiosonde auf die finnische VAISALA RS80 fand an den betrachteten Stationen Ende 1995 statt.

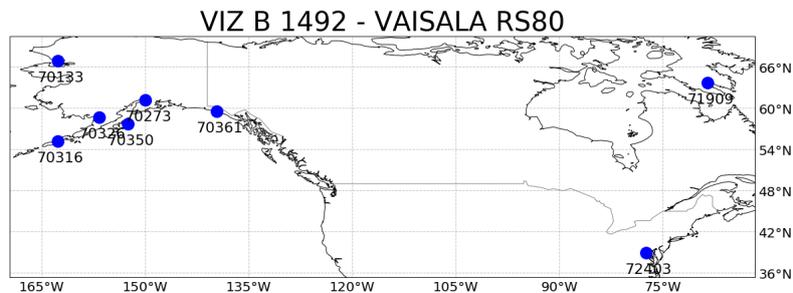


Abbildung 22: Verwendete Stationen für den VIZ B 1492 - VAISALA RS80 vergleich. Der Wechsel von der amerikanischen Radiosonde auf die Finnische VAISALA RS80 fand im November und Dezember 1995 statt.

## 5.2 Regionaler Vergleich

In diesem Abschnitt werden die regionalen Vergleiche besprochen. Die betrachteten Radiosondentypen waren an den für die Vergleiche verwendeten Stationen immer im Zeitraum von Oktober 1986 - Jänner 1990 im Einsatz. Es wurden außerdem für jeden Vergleich dieselben VAISALA RS80 Stationen verwendet. Daher sind die VAISALA RS80 Radiosonden nur in Abbildung 26 abgebildet.

### 5.2.1 Bündelung

Bevor wir zu den Ergebnissen der Regionalen Vergleich kommen, muss hier noch ein Problem diskutiert werden, welches bei den Untersuchungen aufkam. Es machte häufig den Anschein, dass die Radiosondenaufstiege, obwohl Background departures verwendet wurden, einen gewissen regionalen Effekt aufweisen.

In der Abbildung 23 sind die Background departures der Radiosondenaufstiege des Typs China GZZ über den Zeitraum von 3 Jahren gemittelt. Man sieht ganz klar, dass es zwei Bündel an Linien gibt. Als Background wurde hier die Reanalyse ERA5 verwendet.

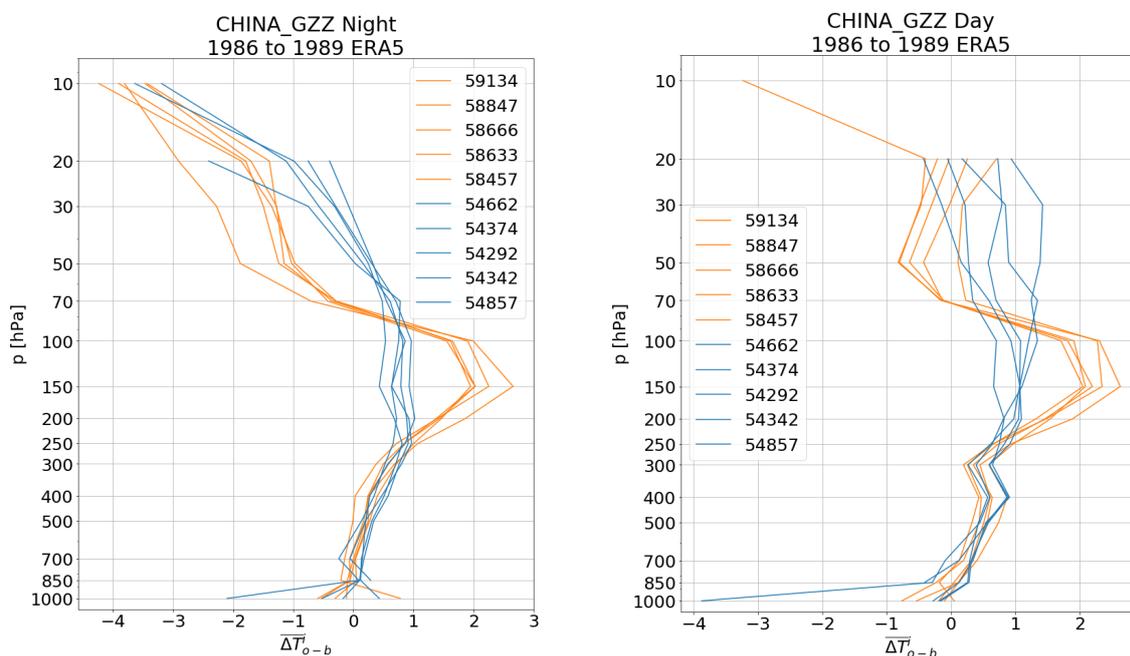


Abbildung 23: Mittlere Background departures über den Zeitraum 1986 bis 1989. Einmal in der Nacht (links) und am Tag (rechts). Es sind klar zwei Bündel an Linien zu erkennen. Hier wurde die Reanalyse ERA5 als Background verwendet.

An der Verteilung der Stationen in Abbildung 24 sieht man, dass die Stationen räumlich getrennt sind. Die Stationen im Süden liefern im Mittel andere Ergebnisse als die Stationen im Norden, obwohl die Background departures betrachtet werden. Hier in dieser Konstellation gibt es einen ganz klaren regionalen Effekt, der die Ergebnisse beeinflusst.

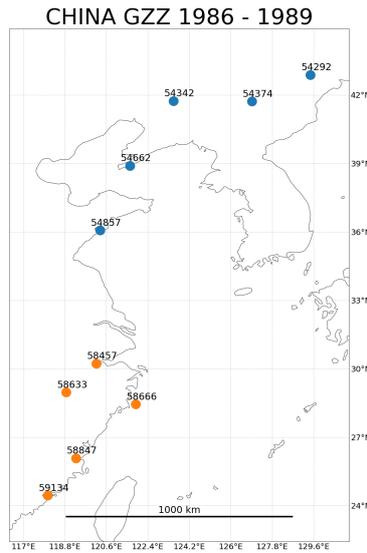


Abbildung 24: Betrachtete Stationen für die gefundene Bündelung. Man erkennt klar eine regionale Trennung. Die blauen Stationen im Norden bilden ein Bündel und die orangen im Süden bilden ein Bündel.

Zur Überprüfung wurde derselbe Vergleich mit der Reanalyse JRA55 als Background durchgeführt. Die Ergebnisse sind qualitativ identisch.

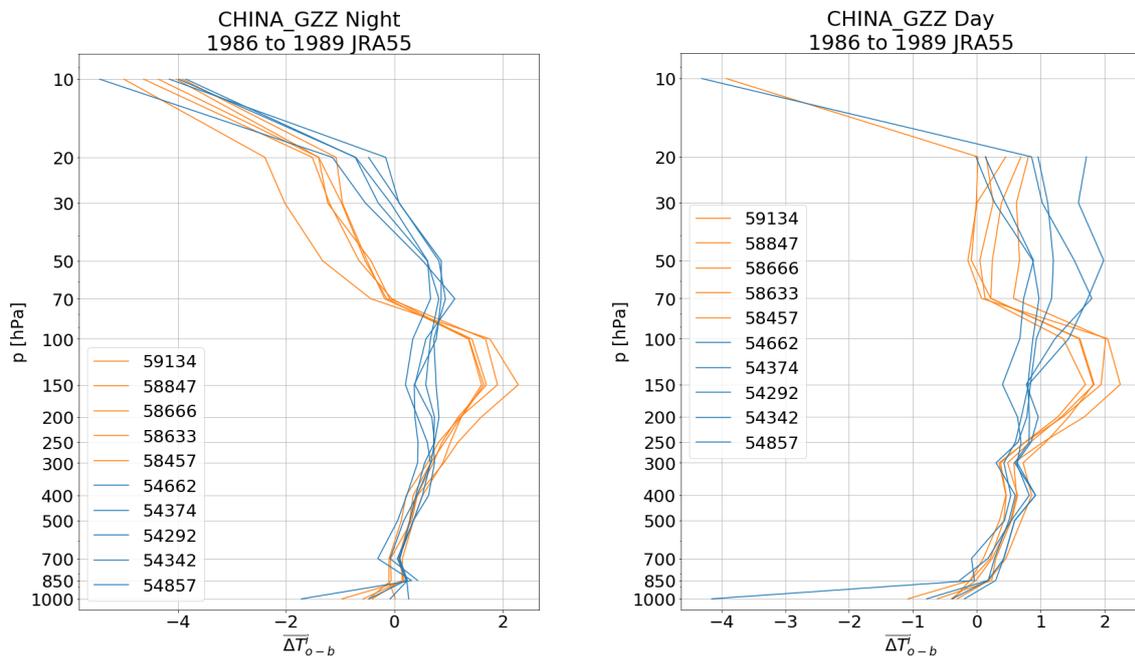


Abbildung 25: Mittlere Background departures über den Zeitraum 1986 bis 1989. Einmal in der Nacht (links) und am Tag (rechts). Es sind klar zwei Bündel an Linien zu erkennen. Hier wurde die Reanalyse JRA55 als Background verwendet.

## 5.2.2 USSR MARS - VAISALA RS80

In Abbildung 26 sind die verwendeten Stationen für den USSR MARS - VAISALA RS80 Vergleich dargestellt. Die verwendeten USSR MARS Stationen befinden sich alle in Europa. Die VAISALA RS80 Stationen befinden sich alle in Skandinavien.

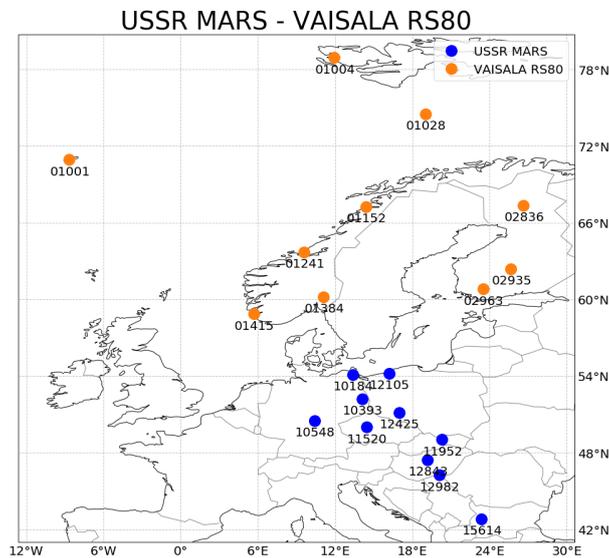


Abbildung 26: Verwendete Stationen für den regionalen Vergleich zwischen der russischen USSR MARS und der finnischen VAISALA RS80 Radiosonde. Der betrachtete Zeitraum ist Oktober 1986 - Jänner 1990

Der regionale Vergleich bei der USSR MARS Radiosonde hat wesentlich besser funktioniert. Die operationellen Ergebnisse sind in Bodennähe ähnlich wie die zuvor gefundenen mittleren Background departures in Abbildung 13. In den höheren Schichten konnten jedoch die experimentellen Ergebnisse wesentlich besser repliziert werden.

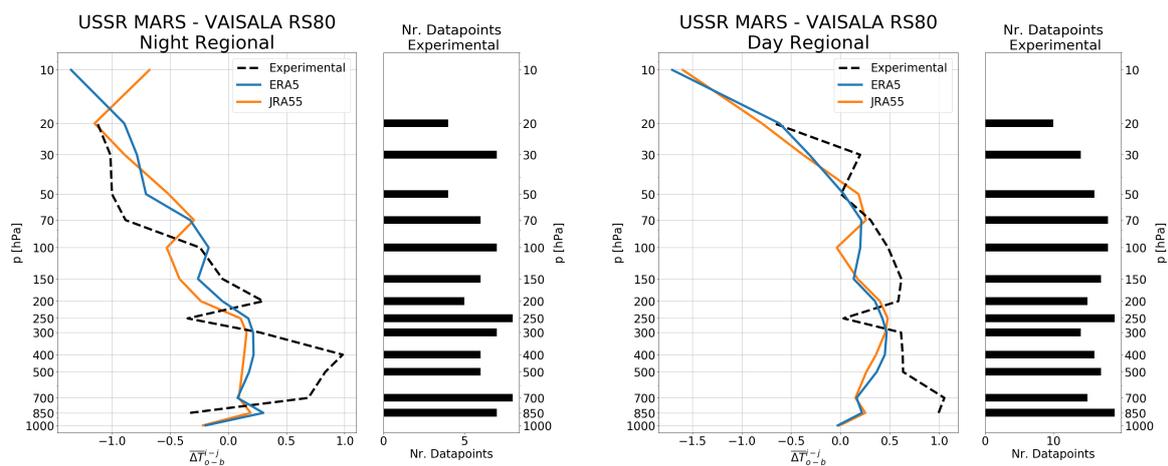


Abbildung 27: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp USSR MARS und VAISALA RS80. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase III.

### 5.2.3 GRAW M60 - VAISALA RS80

In Abbildung 28 sind die verwendeten GRAW M60 Stationen dargestellt. Die Stationen befinden sich erneut alle in Deutschland, bis auf die Station in Gibraltar.

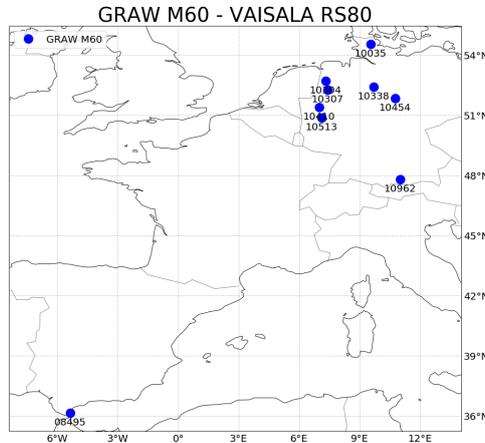


Abbildung 28: Hier sind die verwendeten Stationen für den regionalen Vergleich zwischen den Radiosondentypen GRAW M60 und VAISALA RS80 abgebildet. Der betrachtete Zeitraum ist Oktober 1986 - Jänner 1990

Hier nochmals als Anmerkung, dass die GRAW M60 Radiosonde Teil der zweiten Phase der WMO-Vergleichsexperimente war. Das bedeutet, dass auch hier die Obergrenze des Sonnenstandes für Nachtaufstiege auf 0° gesetzt wurde.

Grundsätzlich unterscheiden sich die hier gefunden Ergebnisse nicht sichtlich von den Ergebnissen in Abbildung 7. Die Ergebnisse des experimentellen Vergleichs konnten erneut repliziert werden.

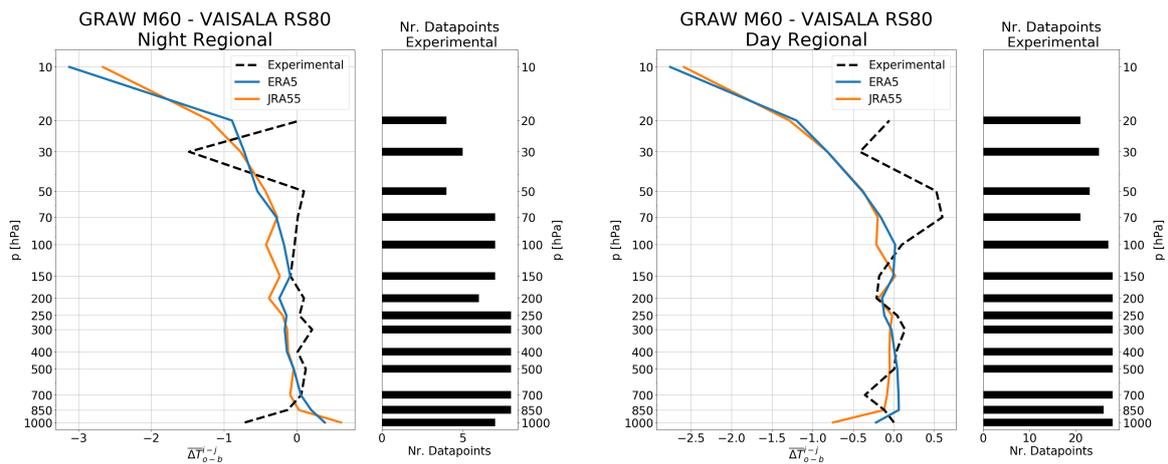


Abbildung 29: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp GRAW M60 und VAISALA RS80. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter 0°) und rechts am Tag (Sonnenstand über 10°). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

### 5.2.4 KEW MARK III - VAISALA RS80

Die verwendeten KEW MARK III Stationen für den Vergleich befinden sich alle in Großbritannien. Die VAISALA RS80 Stationen sind erneut dieselben wie schon bei den regionalen Vergleichen zuvor. Gleiches gilt für den betrachteten Zeitraum.

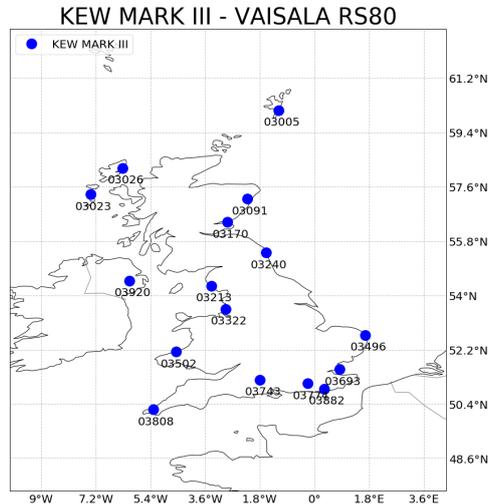


Abbildung 30: Hier sind die verwendeten Stationen für den regionalen Vergleich zwischen den Radiosondentypen KEW MARK III und VAISALA RS80 abgebildet. Der betrachtete Zeitraum ist Oktober 1986 - Jänner 1990

Der regionale KEW MARK III Vergleich fiel sichtlich schlechter aus als der vorangegangene Vergleich in Abbildung 11. Der Vergleich in der Nacht hat etwas besser funktioniert. Jedoch wird vor allem am Tag sichtbar, dass die Methodik des regionalen Vergleichs Probleme birgt. Interessant ist jedoch, dass sich das Ergebnis ausgerechnet bei dem Radiosondentypen verschlechtert, der räumlich am nächsten an den finnischen VAISALA RS80 Radiosonden ist.

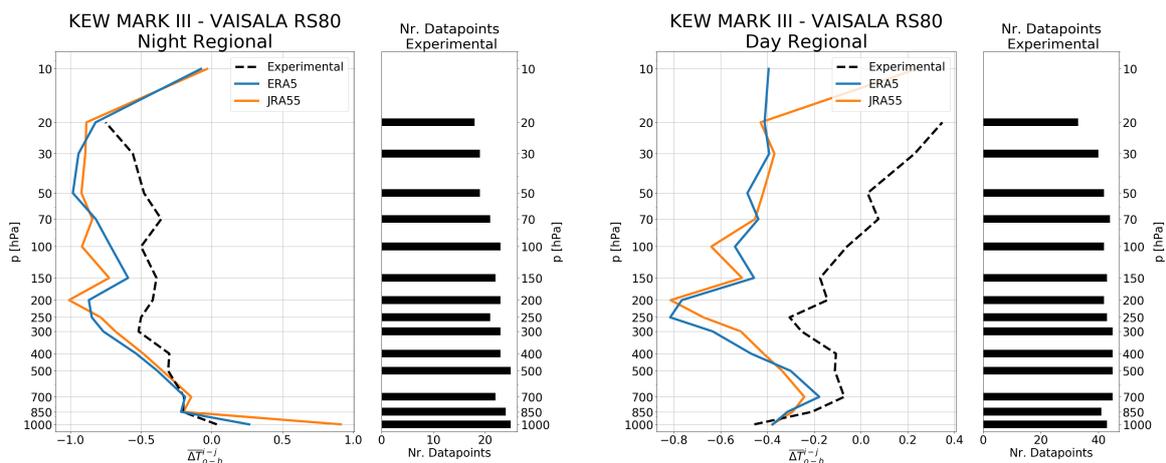


Abbildung 31: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp KEW MARK III und VAISALA RS80. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $0^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase I.

### 5.2.5 JAPAN MEISEI RSII-80 - VAISALA RS80

Die verwendeten Stationen für den Vergleich JAPAN MEISEI RSII-80 - VAISALA RS80 befinden sich alle in Japan und damit sehr weit weg von den VAISALA Radiosonden in Skandinavien.

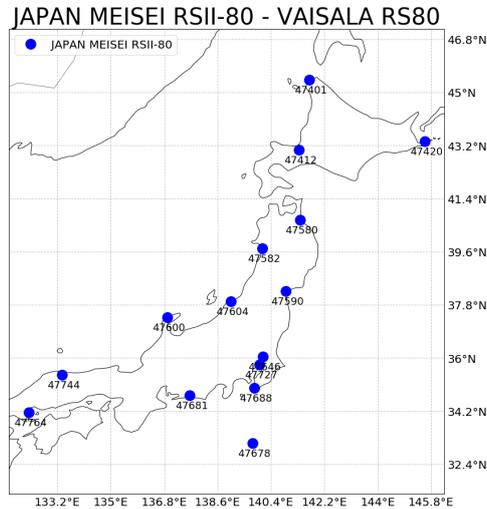


Abbildung 32: Verwendete Stationen für den regionalen Vergleich zwischen der JAPAN MEISEI RSII-80 Radiosonde und der finnischen VAISALA RS80 Radiosonde. Der betrachtete Zeitraum ist Oktober 1986 - Jänner 1990

In Abbildung 33 sind die Ergebnisse für den japanischen Radiosondentypen MEISEI RSII-80 dargestellt.

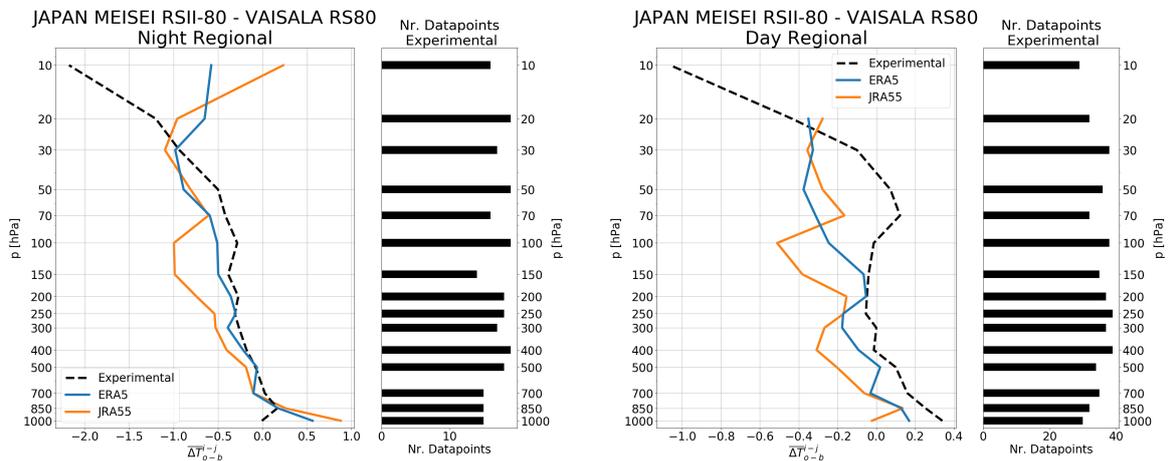


Abbildung 33: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp JAPAN MEISEI RSII-80 und VAISALA RS80. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter 0°) und rechts am Tag (Sonnenstand über 10°). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase IV.

Die japanische Radiosonde hat im regionalen Vergleich vor allem in der Nacht ein sehr gutes Ergebnis geliefert. Die operationellen und experimentellen Ergebnisse sind sich sehr ähnlich. Die experimentellen Ergebnisse konnten zumindest mit der ERA5 reanalyse als Background gut repliziert werden. Der Vergleich mit JRA55 als Background weicht in den mittleren Schichten wesentlich stärker von

dem experimentellen Ergebnis ab. Am Tag sieht das Ergebnis ähnlich aus. Das Ergebnis sieht zwar unruhiger aus, aber die Skala ist bei diesem Plot wesentlich feiner. Auch hier sind die Ergebnisse mit der ERA5 Reanalyse wieder besser.

Für solche Fälle wie der japanischen Radiosonde eignet sich der regionale Vergleich sehr gut, da die Stationen in Japan kaum andere Radiosondentypen verwendet haben.

### 5.2.6 CHINA GZZ - VAISALA RS80

Für den chinesischen Radiosondentyp gilt dasselbe wie für den japanischen Typen. Die hier betrachteten Stationen liegen alle in China und sind somit sehr weit von den finnischen VAISALA RS80 Radiosondenstationen entfernt.

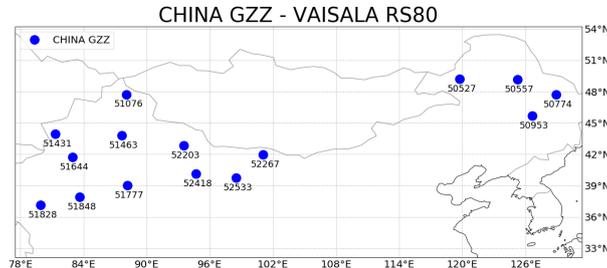


Abbildung 34: Verwendete Stationen für den regionalen Vergleich zwischen der chinesischen CHINA GZZ und der finnischen VAISALA RS80 Radiosonde. Der betrachtete Zeitraum ist Oktober 1986 - Jänner 1990

Die experimentellen Ergebnisse mit den chinesischen Radiosonden ließen sich gut mit den operativen Daten replizieren. Interessant ist, dass die Abweichungen zwischen den beiden Typen in der Nacht sowohl in der Höhe als auch am Boden sehr groß ist. Da es sich um Nachtaufstiege handelt, kann es sich hier nicht um einen Strahlungsfehler handeln. Bei der Abweichung am Boden dürfte es sich eher um einen Fehler in den Daten handeln, da sie nur auf 1000hPa auftritt. Gemittelt wurde hier über alle in Abbildung 34 dargestellten Stationen.

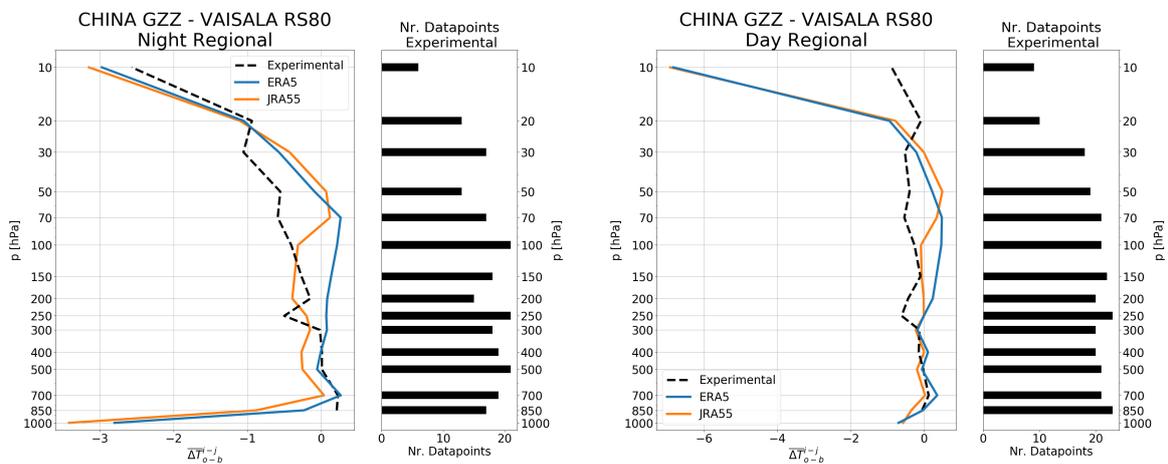


Abbildung 35: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp CHINA GZZ und VAISALA RS80. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter 0°) und rechts am Tag (Sonnenstand über 10°). Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase III.

### 5.3 Strahlungsfehler

In diesem Abschnitt wurden dieselben Stationen für die operationellen Daten verwendet, wie schon im Abschnitt 5.1 bzw. im Abschnitt 5.2. Daher gibt es in diesem Abschnitt keine Kartenplots mehr mit den verwendeten Stationen.

#### 5.3.1 AUSTRALIA PHILIPS MK III

Bei dem Radiosondentyp AUSTRALIA PHILIPS MK III war ein solcher Vergleich sehr schwierig. Die operationellen Radiosonden erreichten die relevanten Höhen nicht. Bei den experimentellen Daten sieht es so aus, als hätten die Radiosonden einen klaren Strahlungsfehler. Jedoch ist das Ergebnis nicht sonderlich signifikant, da bei diesem Vergleichsexperiment kaum Nachtaufstiege vorhanden waren. Die wenigen Nachtaufstiege liegen relativ nahe am Sonnenaufgang/-untergang. Daher ist der Vergleich nur schwer interpretierbar. Wie schon zuvor wurde hier außerdem aufgrund der geringen Datendichte wieder die Obergrenze des Sonnenstandes für Nachtaufstiege auf  $0^\circ$  gesetzt.

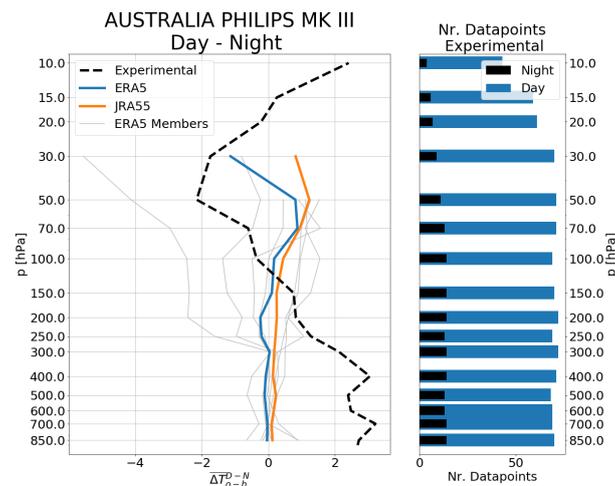


Abbildung 36: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $0^\circ$ ) des Radiosondentyps AUSTRALIA PHILIPS MK III dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

#### 5.3.2 KEW MARK III

Bei der KEW MARK III gab es ein ähnliches Problem wie schon bei der australischen Radiosonde. Die operationellen Radiosonden haben die notwendigen Niveaus nur selten erreicht. Grundsätzlich sind die operationellen Ergebnisse jedoch recht nahe an den experimentellen Ergebnissen.

Die experimentellen Daten zeigen einen doch recht ausgeprägten Strahlungsfehler in den höheren Schichten.

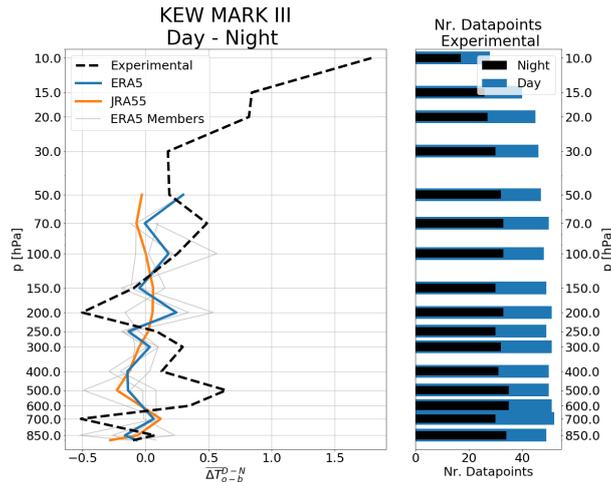


Abbildung 37: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) des Radiosondentyps KEW MARK III dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase I.

### 5.3.3 GRAW M60

Bei der GRAW M60 gab es wie bei der australischen Radiosonde kaum Nachtaufstiege. Daher wurde wieder die Bedingung für Nachtaufstiege auf einen Sonnenstand von unter  $0^\circ$  angepasst. Das Ergebnis ist aufgrund der geringen Datendichte nur schwer interpretierbar. Das operationelle Ergebnis weist kaum Ähnlichkeiten mit dem experimentellen Ergebnis auf. Das dürfte in erster Linie daran liegen, dass die experimentellen Ergebnisse nicht wirklich repräsentativ sind, da nur sehr wenige Nachtaufstiege zur Verfügung standen. Aber zumindest dem operationellen Ergebnis nach zu urteilen, hat die GRAW M60 einen leichten Strahlungsfehler.

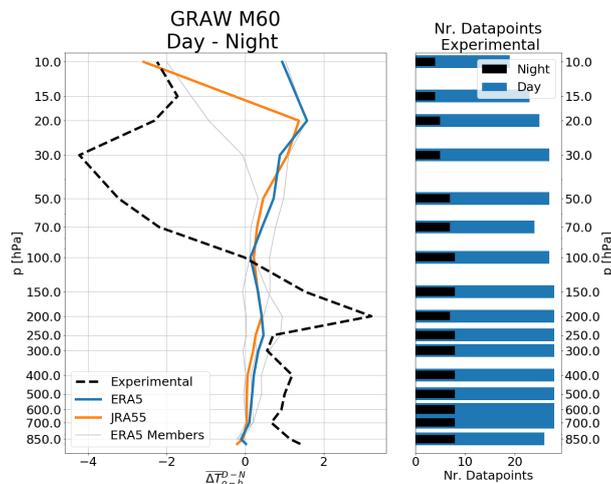


Abbildung 38: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $0^\circ$ ) des Radiosondentyps GRAW M60 dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

### 5.3.4 VAISALA RS80

Die VAISALA RS80 hat weder in den experimentellen noch in den operationellen Daten einen Strahlungsfehler. Die beiden Ergebnisse bestätigen sich gegenseitig. Die Differenzen der Background departures weisen jedoch eine recht große Streuung auf. Es wurden aber auch vergleichsweise viele Stationen betrachtet.

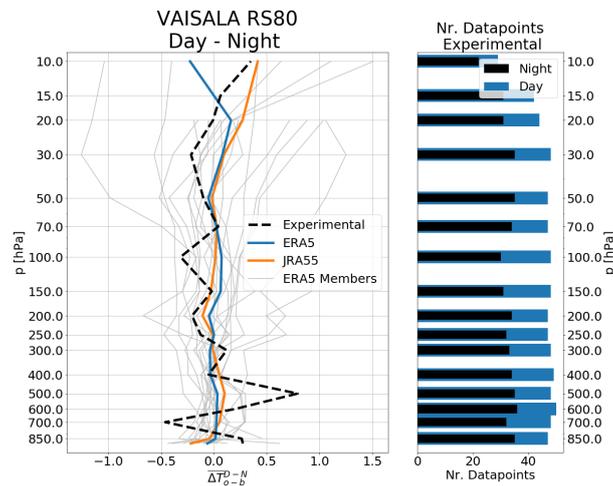


Abbildung 39: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) des Radiosondentyps VAISALA RS80 dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase I.

### 5.3.5 VIZ MK II

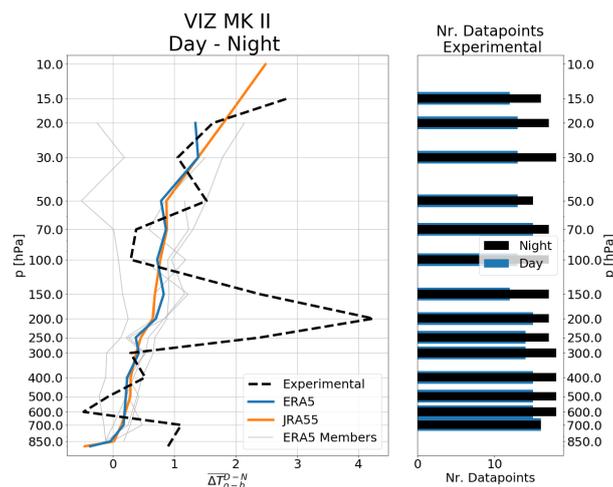


Abbildung 40: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) des Radiosondentyps VIZ MK II mit dem kleinen Thermistor dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase IV.

Bei der VIZ MK II wurde hier die Variante mit dem kleinen Thermistor für den Vergleich gewählt, da diese anfälliger für einen Strahlungsfehler sein sollte. Grundsätzlich sind sich die operationellen und

experimentellen Ergebnisse sehr ähnlich. Seltsam ist jedoch der extreme Ausreißer auf 200hPa in den gemittelten experimentellen Daten. In den Daten sind Ausreißer enthalten, die durch die Methodik, welche in Abschnitt 3.3 beschrieben ist, nicht entfernt wurden. Da der Stichprobenumfang so gering ist, haben sie hier einen starken Einfluss auf das Endergebnis. Sowohl mit den experimentellen Daten als auch den operationellen Daten konnte ein Strahlungsfehler festgestellt werden.

### 5.3.6 USSR MARS

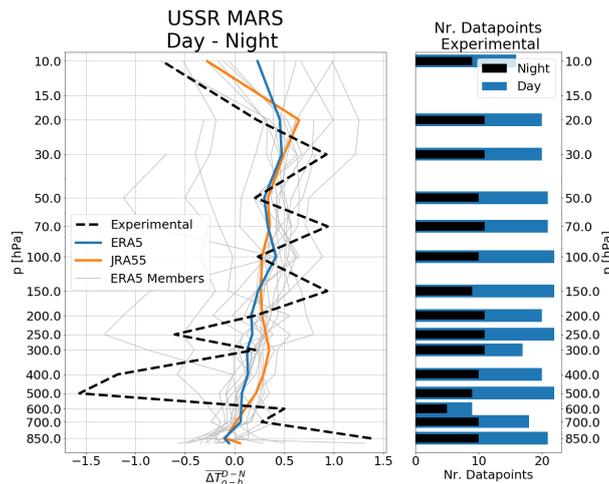


Abbildung 41: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über 10°) und der Nacht (Sonnenstand unter -10°) des Radiosondentyps USSR MARS dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase III.

Die USSR MARS Radiosonde zeigt in Abbildung 41 keinen signifikanten Strahlungsfehler. Man sieht bei diesem Typen aber wieder eine große Streuung bei den mittleren Backgrounddeparture-Differenzen. Außerdem schwanken die experimentellen Daten sehr stark aufgrund der wenigen vorhandenen Nachtaufstiege.

### 5.3.7 JAPAN MEISEI RSII-80

Die experimentellen und operationellen Ergebnisse zeigen hier keine Übereinstimmung. Hier sind die experimentellen Daten sehr unruhig und zeigen große Sprünge. Die operationellen mittleren Differenzen der Background departures zeigen aber kaum Streuung und sehen nach einem realistischen Ergebnis aus. Diese zeigen einen leichten Strahlungsfehler.

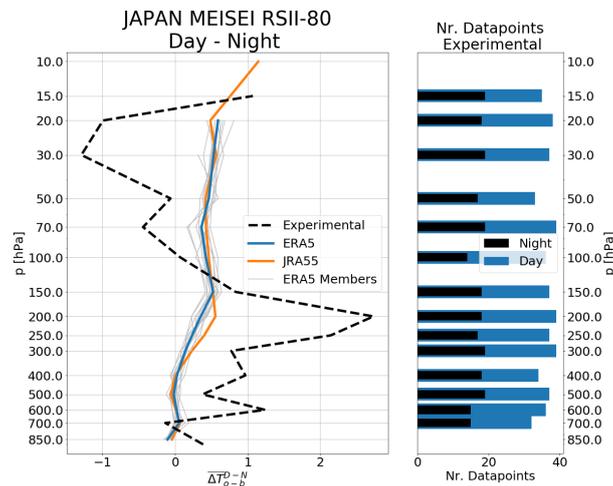


Abbildung 42: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) des Radiosondentyps JAPAN MEISEI RSII-80 dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase IV.

### 5.3.8 CHINA GZZ

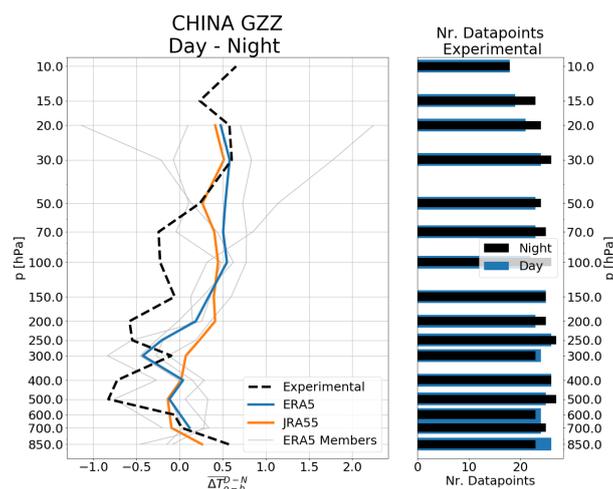


Abbildung 43: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) des Radiosondentyps CHINA GZZ dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase III.

Die CHINA GZZ Radiosonde weist keinen nennenswerten Strahlungsfehler auf. Bei diesem Vergleich fällt vor allem auf, dass die mittleren Backgrounddeparture-Differenzen in den hohen Schichten sehr

Stark streuen. Im Mittel ergibt sich daraus jedoch kein Strahlungsfehler. Grundsätzlich sieht das operationelle Ergebnis und das experimentelle Ergebnis ähnlich aus und sie bestätigen sich gegenseitig.

### 5.3.9 USA SPACE DATA

Am Ende noch die USA SPACE DATA Radiosonde, obwohl sie nicht in den Vergleichsexperimenten vorhanden war, wird sie hier kurz besprochen. Sie zeigt einen extrem hohen Strahlungsfehler von über  $4^{\circ}\text{C}$  bei dem Vergleich mit der ERA5 Reanalyse als Background. Einige der Member zeigen sogar noch wesentlich größere Fehler.

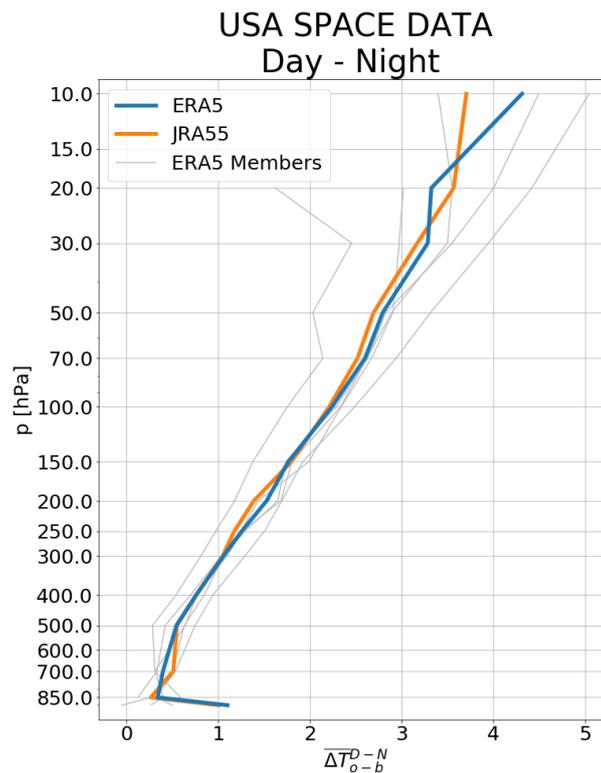


Abbildung 44: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^{\circ}$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^{\circ}$ ) des Radiosondentyps USA SPACE DATA dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps.

## 5.4 Druckkorrektur

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der versuchten Druckkorrektur besprochen. In Abbildung 45 sieht man die mittlere Temperaturdifferenz zwischen der KEW MARK III Radiosonde und der VAISALA RS80. Betrachtet wurden alle gemeinsamen Aufstiege. Die Druckkorrektur hat hier nur einen recht geringen Einfluss auf das Ergebnis. Der Fehler in den Druckmessungen dürfte bei den betrachteten Radiosonden nicht sonderlich groß sein. Das korrigierte Ergebnis kann nicht unbedingt als besser erachtet werden. In den hohen Schichten ist die Abweichung zwischen den beiden Radiosondentypen nach der Korrektur etwas größer als noch zuvor.

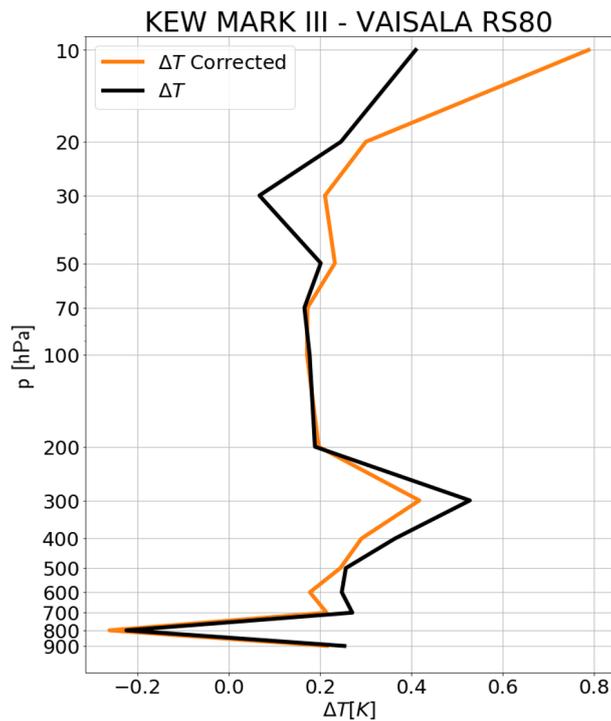


Abbildung 45: Hier sind die gemittelten Temperaturabweichungen zwischen den Radiosondentypen KEW MARK III und VAISALA RS80 mit durchgeführter Druckkorrektur dargestellt. Für diesen Vergleich wurden ausschließlich Daten der Vergleichsexperimente verwendet. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase I.

Als zweites Beispiel sieht man in Abbildung 36 noch die Druckkorrektur für den experimentellen Vergleich zwischen GRAW M60 und VAISALA RS80. Auch hier fallen die Unterschiede nur sehr klein aus. Bei diesem Beispiel stellt die Druckkorrektur eher eine Verschlechterung des Ergebnisses dar.

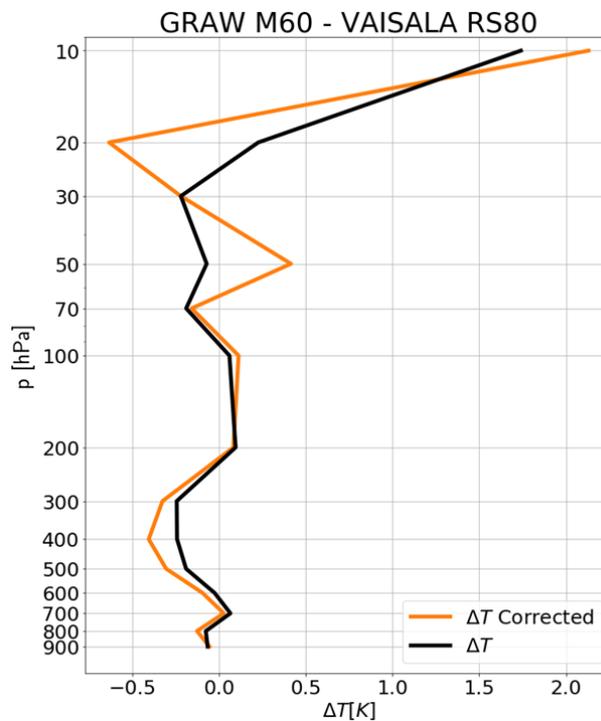


Abbildung 46: Hier sind die gemittelten Temperaturabweichungen zwischen den Radiosondentypen GRAW M60 und VAISALA RS80 mit durchgeführter Druckkorrektur dargestellt. Für diesen Vergleich wurden ausschließlich Daten der Vergleichsexperimente verwendet. Experimentelle Daten aus WMO-Vergleichsexperiment Phase II.

In den 1980er-Jahren, als diese Vergleichsexperimente durchgeführt wurden, hatte man die Problematik der Druckmessung schon wesentlich besser im Griff. Die Ergebnisse würden wohl anders aussehen, wenn man diese Korrektur auf ältere Daten anwenden würde.

## 5.5 Weitere Vergleichsexperimente

In diesem Abschnitt werden noch die Ergebnisse der weiteren Vergleichsexperimente diskutiert. Das Problem ist, dass diese Experimente wesentlich älter sind und entsprechend wesentlich ältere Radiosondentypen verwendet wurden. Für solche frühe Zeitpunkte ist es sehr schwer festzustellen, welcher Radiosondentyp an welcher Station eingesetzt wurde. Ganz generell gab es damals nicht so viele Stationen mit regelmäßigen Radiosondenaufstiegen wie heute. Aus diesem Grund waren nahezu keine Vergleiche möglich, da einfach nicht genügend operationelle Daten zur Verfügung standen. Oft sind auch die Informationen der IGRA-Metadaten zu unsicher und man kann nicht sichergehen, dass auch wirklich der gesuchte Typ an der betrachteten Station im Einsatz war.

Im Grunde war nur ein einziger regionaler Vergleich durchführbar. Das war der Vergleich der britischen KEW MARK II und der Deutschen GRAW H50 Radiosonde. Das dazugehörige Vergleichsexperiment fand 1954 in Brüssel statt [Malet (1955)].

Die verwendeten Stationen sind in Abbildung 47 zu finden. Die Betrachtete Zeitspanne ist 1946 bis 1965. Die beiden Radiosondentypen waren nicht beide über den gesamten Zeitraum im Einsatz. Es gibt lediglich eine Überschneidung. Dieser Umstand macht den Vergleich noch schwieriger.

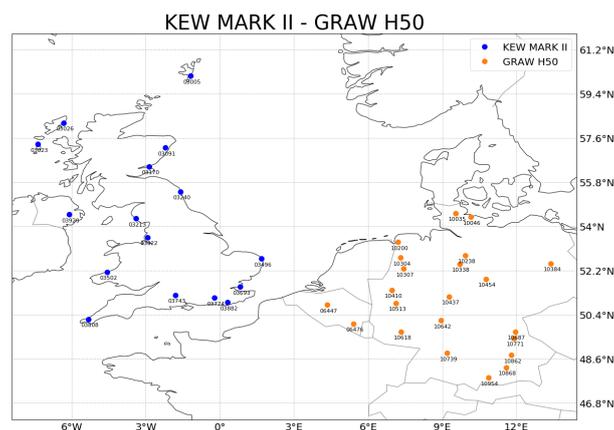


Abbildung 47: Hier sind die verwendeten Stationen für den regionalen Vergleich zwischen der Britischen KEW MARK II und der Deutschen GRAW H50 Radiosonde abgebildet.

Die Ergebnisse des regionalen Vergleichs sind in Abbildung 48 dargestellt.

Der Vergleich entspricht nicht den Erwartungen. Die experimentellen und die operationellen Ergebnisse sind sehr weit voneinander entfernt. Für den experimentellen Vergleich standen jedoch nur sehr wenige Aufstiege zur Verfügung. Die experimentellen Ergebnisse können hier nicht mit operationellen Daten belegt werden.

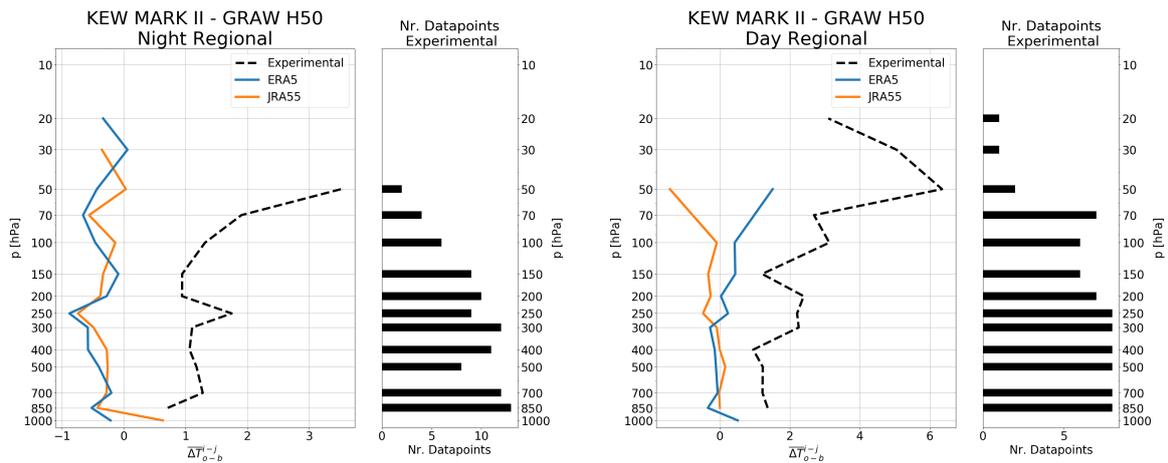


Abbildung 48: Regionaler Vergleich zwischen dem Radiosondentyp KEW MARK II und GRAW H50. Hier ist die Abweichung der gemittelten Background departures der Stationen mit den genannten Radiosondentypen dargestellt. Links in der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) und rechts am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ). Experimentelle Daten aus Malet (1955).

Für die beiden Typen wurde noch der Strahlungsfehler untersucht, jedoch auch hier konnten die experimentellen Ergebnisse nicht reproduziert werden. Auffallend ist jedoch, dass es bei der britischen KEW MARK II Radiosonde kaum Streuung bei den mittleren Backgrounddeparture-Differenzen gibt. Die verwendeten Reanalysen hängen zu dem betrachteten Zeitpunkt wahrscheinlich sehr stark von den Radiosondendaten ab, da es keine Satellitendaten zur Korrektur gibt. Das würde erklären, warum die Differenz zwischen Background und Beobachtung so gering ist. Gleichzeitig ist jedoch der Offset in den experimentellen Daten sehr groß. Eventuell sind die experimentellen Daten nicht repräsentativ.

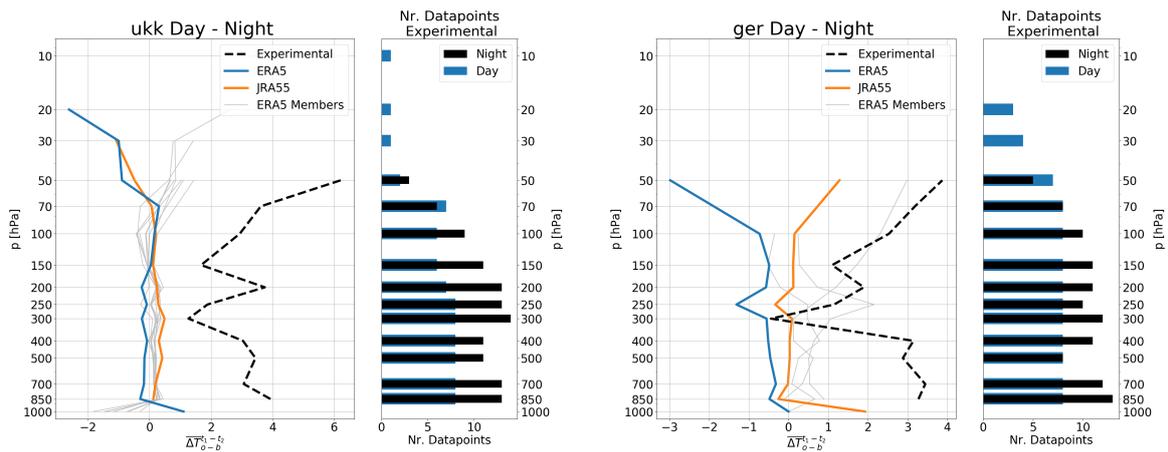


Abbildung 49: Hier ist die Differenz der gemittelten Background departures am Tag (Sonnenstand über  $10^\circ$ ) und der Nacht (Sonnenstand unter  $-10^\circ$ ) der Radiosondentypen KEW MARK II (links) GRAW H50 (rechts) dargestellt. Zu erkennen ist hier der Strahlungsfehler des Radiosondentyps. Experimentelle Daten aus Malet (1955).

## 6. Fazit und Ausblick

Abschließen lässt sich festhalten, dass in den meisten Fällen die Ergebnisse der experimentellen Daten mit den operationellen Daten repliziert werden konnten. Zumeist wurden die Daten der WMO-Vergleichskampagnen betrachtet. Die Ergebnisse dieser Vergleichskampagnen konnten also weitestgehend bestätigt werden. Außerdem konnte man erkennen, dass viele der Vergleiche wirklich sehr große Unterschiede bei den verschiedenen Radiosondentypen aufzeigten. Das bestätigt vor allem die Notwendigkeit, dass solche Vergleiche zwischen Radiosondentypen durchgeführt werden. Besonders interessant ist dies natürlich, wenn die tatsächlich im operationellen Betrieb verwendeten Radiosonden für diese Vergleiche herangezogen werden und man so auch Radiosondentypen betrachten kann, die in den Vergleichsexperimenten gar nicht vorkommen wie z. B. die USA SPACE DATA.

Bei dem regionalen Vergleich stellte die Bündelung eine spannende Problematik dar. Obwohl dieser Effekt die Untersuchung nicht unbedingt einfacher macht, konnten auch mit dieser Methode die meisten experimentellen Ergebnisse der WMO-Vergleichskampagne verifiziert werden. Beim regionalen Vergleich schien es nicht wirklich relevant zu sein, wie weit die betrachteten Stationen voneinander entfernt sind. Sowohl der Vergleich zwischen dem japanischen Radiosondentyp und der finnischen VAISALA RS80 und der Vergleich zwischen CHINA GZZ und VAISALA RS80 lieferten recht gute Ergebnisse. Im Gegenzug fiel der Vergleich zwischen der britischen KEW MARK III und der VAISALA RS80 verhältnismäßig schlecht aus.

Die Untersuchungen zum Strahlungsfehler zeigten, dass viele der betrachteten Radiosondentypen einen signifikanten Strahlungsfehler aufweisen. Auffallend war auch, dass bei diesem Vergleich die experimentellen Ergebnisse nicht so oft repliziert werden konnten wie zuvor bei den anderen Vergleichen. Ein grundsätzliches Problem könnte sein, dass die Radiosonden im operationellen Betrieb immer zu denselben Uhrzeiten starten. Vor allem, wenn die betrachteten Stationen regional nicht weit voneinander entfernt sind, starten die Radiosonden an allen Stationen zur selben Uhrzeit (In den meisten Ländern starten die Radiosonden an allen Stationen zeitgleich). Bei den experimentellen Daten gab es eine breite Auswahl an verschiedenen Startzeiten. Vor allem am Tag hat die Sonnenstrahlung zu unterschiedlichen Uhrzeiten natürlich unterschiedliche Effekte auf, beispielsweise den Strahlungsfehler. Dieser Umstand könnte einen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Die Druckkorrektur lieferte nicht die erwarteten Ergebnisse. Die Unterschiede zu den Ergebnissen vor der Korrektur waren minimal. Die Druckmessungen der betrachteten Radiosondentypen waren bei den Vergleichsexperimenten der WMO wohl sehr präzise, weshalb hier die Korrektur keinen großen Effekt hatte. Es wäre natürlich interessant gewesen zu sehen, ob die Unterschiede bei den operationellen Daten größer ausfallen. Ein solcher Vergleich ist jedoch wie bereits besprochen leider nicht möglich, da es keine operationellen Minuten-Daten der Aufstiege gibt.

Im Verlauf der Vergleiche traten noch manche weitere Probleme auf. Bei einigen der Radiosondentypen (z. B. USSR MARS) konnte bei den Vergleichen eine starke Streuung der Backgrounddeparture-Differenzen festgestellt werden. Oft waren auch vor allem die mittleren experimentellen Ergebnisse sehr unruhig und zeigten starke Schwankungen. Diese Problematiken kann man im Grunde immer auf ein übergeordnetes Problem zurückführen. Nämlich die Datendichte. Sehr häufig standen nur sehr wenige experimentelle Daten zur Verfügung, was einen gesicherten Vergleich schwer macht. Allgemein ist der Stichprobenumfang bei allen Vergleichsexperimenten sehr gering. Bei den operatio-

nellen Daten musste aufgrund der geringen Datendichte häufig der Kompromiss eingegangen werden, dass Stationen verwendet werden, die räumlich sehr weit voneinander entfernt sind. Manchmal musste auch auf Stationen zurückgegriffen werden, bei denen der betrachtete Radiosondentyp zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Einsatz war. Die Datenqualität verändert sich natürlich im Verlauf der Zeit. Dadurch wird der Vergleich ebenfalls schwieriger. Die zu geringe Datendichte wurde bei den weiteren Vergleichsexperimenten zu einem so großen Problem, dass quasi gar kein Vergleich durchgeführt werden konnte. Der einzige Vergleich zwischen der KEW MARK II Radiosonde und der GRAW H50, der hier tatsächlich durchgeführt wurde, konnte die experimentellen Ergebnisse absolut nicht replizieren. Eine weitere Problematik stellten die unterschiedlichen Varianten der Radiosondentypen dar. Im Abschnitt 5.1.5 wurde das bereits kurz besprochen. Die vielen verschiedenen Radiosondentypen kommen in verschiedenen Ausführungen vor. Je nach Gebrauch haben einige Radiosonden z. B. bessere Temperatursensoren oder besser Feuchtesensoren. Die genauen Varianten können bei den operationellen Vergleichen nicht herausgearbeitet werden, da die verwendeten IGRA-Metadaten dafür nicht genau genug sind. Es ist nur in sehr wenigen Fällen bekannt, welche Ausführung genau an einer Station im Einsatz war.

An dieser Stelle kommen wir noch kurz zu einen Ausblick und was von hier aus weiterführend noch betrachtet werden könnte. Die gerade besprochenen verschiedenen Ausführungen der Radiosondentypen sind dabei schon der erste Punkt. Wenn man es schafft, herauszufinden, an welchen Stationen die konkreten Ausführungen der Radiosondentypen im Einsatz waren, wäre es interessant, diese nochmals mit den experimentellen Daten zu vergleichen. Bei einigen Radiosondentypen wie der VAISALA RS80 könnten evtl. genügend Stationen für einen so genauen Vergleich vorhanden sein. Ansonsten gibt es allgemein noch einige Radiosondentypen, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Man könnte den Vergleich noch auf viele weitere Typen ausweiten. Im Zuge dessen könnten all die anderen Vergleichsexperimente betrachtet werden, welche in dieser Arbeit aufgrund von der fehlenden Datendichte nicht berücksichtigt wurden. Das IGRA-Metadaten File ist für ältere Radiosondentypen recht ungenau, was für die geringe Datendichte sorgt. Wenn man die Zeitserien der einzelnen Radiosondenstationen nochmals genauer untersucht, könnte man die Datendichte evtl. erhöhen. Ein solches Unterfangen wäre bestimmt sehr zeitaufwendig, aber man könnte hier bestimmt nochmals ansetzen und auch brauchbare Ergebnisse produzieren. Zum Schluss wäre es noch interessant, die Vergleiche mit weiteren Reanalysen als Background durchzuführen. Die hier verwendeten Reanalysen ERA5 und JRA55 sind nicht vollkommen unabhängig von den betrachteten Radiosonden selbst. Es wäre interessant den Vergleich mit einer von den Radiosonden unabhängigen Reanalyse durchzuführen. Besonders spannend wäre zu sehen, ob man einige der schlechteren Ergebnisse so verbessern könnte.

## Literaturverzeichnis

- Alexandersson, H. (1986), A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology* **6**(6), 661–675. doi:10.1002/joc.3370060607.
- Barker, D., W. Huang, Y.-R. Guo, and A. Bourgeois (2003), A three-dimensional variational (3dvar) data assimilation system for use with mm5 doi:10.5065/D6CF9N1J.
- Durre, I., R. Vose, and D. Wuertz (2006), Overview of the integrated global radiosonde archive. *Journal of Climate - J CLIMATE* **19**. doi:10.1175/JCLI3594.1.
- Firing, E. (2020), Pysolar: staring directly at the sun since 2007. <https://pysolar.readthedocs.io/en/latest/>, Eingesehen am 26.10.2020. URL: <https://pysolar.readthedocs.io/en/latest/>.
- Gaffen, D. J. (1994), Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **99**(D2), 3667–3676. doi:10.1029/93JD03179.
- Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka (2008), Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records—some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. *Journal of Climate - J CLIMATE* **21**, 4587–4606. doi:10.1175/2008JCLI1929.1.
- Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka (2012), Homogenization of the Global Radiosonde Temperature Dataset through Combined Comparison with Reanalysis Background Series and Neighboring Stations. *Journal of Climate* **25**(23), 8108–8131. doi:10.1175/JCLI-D-11-00668.1.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut (2020), The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**(730), 1999–2049. doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Ivanov, A., A. Kats, S. Kurnosenko, N. Nash, and N. Zaitseva (1991), WMO INTERNATIONAL RADIOSONDE COMPARISON PHASE III .
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi (2015), The jra-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **93**(1), 5–48. doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Malet, L. (1955), *Comparaison régionale des radiosondes*. Institut météorologique. URL: <https://books.google.at/books?id=GmH8vgEACAAJ>.
- Nash, J. and F. J. Schmidlin (1987), WMO INTERNATIONAL RADIOSONDE COMPARISON .
- Onogi, K. (2000), The long-term performance of the radiosonde observing system to be used in era-40 (2), 77.
- Parker, D. E., M. Gordon, D. P. N. Cullum, D. M. H. Sexton, C. K. Folland, and N. Rayner (1997), A new global gridded radiosonde temperature data base and recent temperature trends. *Geophysical Research Letters* **24**(12), 1499–1502. doi:10.1029/97GL01186.

- 
- Schmidlin, E. J. (1988), WMO INTERNATIONAL RADIOSONDE INTERCOMPARISON PHASE II, 1985 .
- Sheerwood, S. C. (2007), Simultaneous detection of climate change and observing biases in a network with incomplete sampling .
- Yagi, S., A. Mita, and N. Inoue (1996), WMO INTERNATIONAL RADIOSONDE COMPARISON PHASE IV .