

TEMPERATUR- UND FEUCHTIGKEITSPROFILE: VERGLEICH VON RADIOSONDEN UND BODENGESTÜTZTEN FERNERKUNDUNGSSYSTEMEN

P. JEANNET¹, D. RUFFIEUX¹, R. NATER¹, H. BERGER¹, G. LEVRAT¹ und T. HEWISON²

¹*MeteoSchweiz, Aerologische Station, Payerne, Schweiz*

²*Met Office, University of Reading, Reading, UK*

1 EINLEITUNG

Temperatur und Luftfeuchtigkeit gehören zu den wichtigsten meteorologischen Messparametern. Ihre Vertikalprofile werden im weltweiten meteorologischen Messnetz mittels Radiosondierungen gewonnen, deren zeitliche Auflösung zwischen zwei bis vier Sondierungen pro Tag beträgt. Eine viel höhere zeitliche Auflösung bietet die Fernerkundungstechnologie an, wie zum Beispiel die bodengebundene passive Mikrowellen-Radiometrie. Letztere ist aber mit einer reduzierten vertikalen Auflösung und geringeren Messgenauigkeit gegenüber den Radiosondierungen gekennzeichnet. Neben der Weiterentwicklung dieser Technologie streben internationale Anstrengungen die Integration verschiedener Fernerkundungssysteme an, um die Ansprüche der numerischen Modelle bezüglich Vertikalprofile bestmöglich zu genügen. Im Rahmen der COST Aktion 720 („Integrated remote sensing system for physical and chemical atmospheric parameters“) wurde die internationale Messkampagne TUC („Temperature, humidity and cloud profiling experiment“) im Winter 2003-04 an der aerologischen Station von Payerne durchgeführt (Ruffieux et al., 2004). Ein Ziel war die Gewinnung eines Datensatzes für die Validierung verschiedener bodengestützter Fernerkundungsinstrumente. Speziell untersucht wurden zum einen die vertikalen Feuchtigkeits- und Temperaturprofile in der planetarischen Grundschicht, zum anderen die automatische Bestimmung der Wolken. Da Payerne im Schweizer Mittelland auf 491 m/Meer zwischen den Alpen und der Jura-Kette liegt, entwickeln sich dort im Winter häufig Temperaturinversionen und Bodennebel oder Hochnebel. Dies hat die Wahl des Standorts und der Jahresperiode für diese Messkampagne mitbestimmt. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Temperatur- und Feuchteprofile. Zwei Ziele werden anvisiert: erstens der Nachweis der Qualität der Radiosondenmessungen, zweitens der Vergleich der Messungen des Mikrowellen Radiometers Radiometrics TP/WVP-3000 mit denjenigen der Radiosonden.

2 METHODEN

Die drei Radiosondensysteme und die drei beteiligten Mikrowellen Radiometer werden in der Tabelle 1 vorgestellt. Um den bestmöglichen Sondierungsdatensatz zu gewinnen, wurden die operationellen Sondierungen mit der Meteolabor Sonde SRS-400 um 00 und 12 UTC an interessanten Tagen durch zusätzliche Sondierungen um 06 und 18 UTC ergänzt. Insgesamt wurden somit etwa 220 Sondierungen während des Experimentes durchgeführt. Außerhalb dieser Tageszeiten wurden zusätzlich etwa 20 Sondierungen mit einer Vaisala Sonde RS80 erhoben. Da die Messung der Luftfeuchtigkeit der operationellen Radiosonden oftmals mit einem nicht vernachlässigbaren Messfehler behaftet ist, wurde bei ausgewählten Sondierungen eine spezielle Radiosonde mit dem Taupunktspiegel-Hygrometer „Snow White“, (Schneewittchen) unter dem gleichen Ballon mit einer SRS und einer RS80 Sonde geflogen. Somit kann die Qualität der „in situ“ Messungen bestmöglich belegt werden.

Die Schweizer Radiosonde SRS-400 misst die Lufttemperatur mit einem Kupfer-Konstantan Thermolement, den Druck mit einem Wasser-Hypsometer (Richner et al., 1999), und die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Hygristor (Zellulose-Kohle-Widerstands-Bauteil der US-Firma Sippican). Die Genauigkeit des Thermometers in Laborbedingungen liegt bei ± 0.1 K im ganzen Messbereich. Für Sondierungen während des Tages ist eine Strahlungskorrektur nötig, welche -0.4 K bei 500 hPa (5600

m) und -0.65 K bei 200 hPa (11'000 m) beträgt und ungeachtet vom Wolkenbedeckungsgrad angewandt wird (Ruffieux et al., 2003). Unter -30 Grad Celsius nimmt die Antwortzeit des Sippican-Hygristor mit negativeren Temperaturen sehr stark an, sodass der Messfehler 10% relative Feuchtigkeit übersteigt (z. B. Schmidlin and Ivanov, 1998). In Wolken bleibt es auch öfters um 95 – 97% relative Feuchtigkeit (über Wasser); der Wert von 100% wird selten erreicht, auch bei geschlossener Wolkendecke.

Der Messbereich des Snow White Taupunktspiegel-Hygrometers geht von ~ 5 % bis zu 100 % relative Feuchtigkeit (Fujiwara et al., 2003, Vömel et al., 2003), wobei Übersättigungen in Wolken gemessen werden (Spiegeltemperatur höher als die Lufttemperatur). Dies kommt daher, dass gewisse Sensorteile unter kritischen Bedingungen geheizt werden, was die Tröpfchen oder Eiskristalle zum Verdunsten bringt. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass dieser Fühler ein Kandidat für die Verwendung als Referenzgerät für die Feuchtigkeit in der Troposphäre gilt (Wang et al., 2003). Oberhalb der Tropopause erreicht das Peltier-Element nicht mehr die nötige Temperaturerniedrigung.

Die Vaisala Sonde RS80 misst die Lufttemperatur mit einem kleinen kapazitiven Fühler, der mit einer speziellen Oberflächenbearbeitung den Strahlungsfehler minimiert und ihr Verhalten in Nebel- und Wolkenlagen optimiert. Der Humicap A Feuchtsensor ist ein kapazitiver Hygristor, der bezüglich Reproduzierbarkeit und Reaktionszeit bei tiefen Temperaturen besser als der Sippican Hygristor ist. Verschiedene Algorithmen wurden entwickelt, um seine Messfehler nachträglich zu reduzieren (Miloshevich et al., 2001), welche im vorliegen Datensatz noch nicht angewandt wurden.

Das TP/WVP-3000 Mikrowellen Radiometer der Firma Radiometrics Corporation, Boulder ist ein passives System, das die Helligkeitstemperatur der Atmosphäre bei 12 verschiedenen Frequenzen misst (Ware et al., 2003). Die Inversionsmethode gestattet daraus ein Temperatur- und Feuchteprofil in 100 Meter Schichten bis zu 1 Km über Boden zu rechnen, sowie in 250 Meter Schichten bis 10 km (47 Punkten). Ab etwa 7 km nähern sich diese Profile dem klimatologischen Wert. Die Rechenalgorithmen arbeiten mit neuronalen Netzwerken, welche mit 10 Jahren von Payerne Sondierungen trainiert wurden. Obwohl das System in jedem 6 Minuten Messzyklus sowohl im Zenith wie in verschiedenen Höhenwinkel misst, werden hier nur die Zenith-Resultate untersucht.

Messsystem	Hersteller	Messparameter	Messkadenz	Max. Höhe	Besitzer
Radiosonde SRS 400	Meteolabor	T, RH, P, wind	2 bis 4 pro Tag	> 30 km	MeteoSchweiz (CH)
Radiosonde "SnowWhite" (Schneewittchen)	Meteolabor	T, RH, P, wind	Unregelmässig	~ 12 km (RH)	MeteoSchweiz (CH)
Radiosonde RS80	Vaisala	T, RH,P, Wind	Unregelmässig	> 30 km	MeteoSchweiz (CH)
Mikrowellen Radiometer TV/WVP-3000	Radiometrics Inc. (USA)	T, RH IWV	6 Minuten	10 km	Met Office (UK)
Mikrowellen Radiometer ASMUWARA	Institut für Angewandte Physik, Uni Bern (CH)	T, RH IWV	~ 20 Minuten	5 km	Institut für Angewandte Physik, Uni Bern (CH)
Mikrowellen Radiometer MTP 5HE	Kipp and Zonen (NL)	T	5 Minuten	1 km	Kipp and Zonen (NE)

Tabelle 1. Messsysteme für die Vertikalprofile der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit in der TUC-Messkampagne von Payerne (T = Temperatur, RH = relative Feuchtigkeit, P = Luftdruck, Wind = Windgeschw. und -richtung, IWV = Wasserdampfsäule).

Bei allen Vergleichen zwischen den „in situ“ und Fernerkundungsmessungen müssen die spezifischen Eigenschaften beider Technologien berücksichtigt werden, insbesondere die unterschiedlichen Mittelungszeiten, vertikalen und zeitlichen Auflösungen der verschiedenen Messsysteme. Beide Messtechniken proben nicht das gleiche Luftpaket. Währenddem die Fernerkundung die Atmosphäre entweder senkrecht über dem Gerät oder schräg in verschiedenen Höhenwinkeln erprobt, misst eine Radiosonde jederzeit am exakten Ort wo sie von Wind und Ballonauftrieb verfrachtet wird. Die

Unsicherheiten, die sich daraus beim Vergleich von „in situ“ und Fernerkundungsmesssystemen ergeben, übersteigen deshalb die effektiven Messfehler.

3 FALLUNTERSUCHUNGEN

Die häufig auftretenden Temperaturinversionen und Nebellagen erlauben namentlich eine eingehende Validierung der Radiometer. Die Abbildung 1 stellt sechs beispielhafte Vergleiche zwischen den Radiosondierungen und dem Radiometer TP/WVP-3000 dar. Für jeden Fall werden die Vertikalprofile der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit untersucht, welche einerseits durch zwei bis drei Radiosonden unter demselben Ballon und andererseits durch das Radiometrics TP/VWP-3000 Mikrowellen Radiometer etwa gleichzeitig erhoben wurden. Aus diesen sechs Fällen kann eine gute qualitative Bewertung der unterschiedlichen Messtechniken abgeleitet werden.

Bezüglich Temperatur sind die drei aerologischen Systeme gleich gut für die Validierung des überprüften Radiometers. Ihre Profile überdecken sich sehr gut. Einzelne Abweichungen sind durch kurze Empfangslücken einzelner Radiosondensignale (Fall Nr. 72, Figur recht oben), bzw. durch den Psychrometer-Effekt nach Durchgang einer Wolkenschicht. Letzterer ist bei den SRS-Sondierungen manuell korrigiert worden.

In den dargestellten Fällen mit Temperaturinversionen zeigt das TP/WVP-3000 Radiometer die Hauptinversion auf. Es erfasst die Bodeninversionen recht gut (siehe insbesondere die Graphik unter links in der Abbildung 1), wobei das Thermometer auf 1 Meter/Boden für dieses Gerät eine gewichtige Rolle spielt. Bei starken Bodeninversionen gibt es auch relativ gut den Temperatursprung am oberen Rand der Inversion wieder. Sobald die Inversion abgehoben wird, hat dieses Gerät Schwierigkeiten ihre untere Grenze zu finden (siehe die zwei oberen Graphiken der Abbildung), ansonst eine mächtige adiabatische Schicht unterhalb der Inversion liegt (siehe mittlere Graphik rechts). Im letzteren Fall wird die Temperaturamplitude der Höheninversion nicht korrekt wiedergegeben. Höheninversionen mit einer Basis oberhalb von einem km über Boden werden durch das Radiometer nicht mehr erfasst. Bei komplexer vertikaler Temperaturschichtung kann festgestellt werden, dass die 100 m vertikale Auflösung nicht einer effektiven Messauflösung entspricht. Die beschränkte Anzahl Spektrallinien des Radiometers ermöglichen nur geglättete Vertikalprofile zu erzeugen. Die vertikale Auflösung des Radiometers steuert auch die Höhengrenzen der Inversionen. Oberhalb von einem km/Boden können sie nur in 250 m Schritten angegeben werden. Dies ist ein weiterer Grund weshalb die oberen Grenzen der Inversionen ungenauer wiedergegeben werden als die unteren.

Die Messung der relativen Feuchtigkeit ist prinzipiell schwieriger als diejenige der Temperatur. Dies ist schon beim Vergleich der Vertikalprofile der 3 Sonden ersichtlich. In tiefen Wolken (Nebel) erreichen die operationellen Sonden selten die Sättigung. Oberhalb einer tiefen Stratusdecke nimmt der Sippican Hygristor der SRS Sonde öfters einen falschen Wert ein, wahrscheinlich wegen einer Frostbeschichtung des Sensors (siehe Graphik in der Mitte rechts). Die Feuchtigkeitsmessungen der drei Sonden unterscheiden sich bei stark negativen Temperaturen in der oberen Troposphäre (oberhalb vom Höhenbereich der Abbildung 1). Immerhin belegen die sechs Fälle der Abbildung 1, dass die Sondenmessungen bezüglich Feuchte in der unteren Troposphäre relativ gut übereinstimmen. Einzelne Sondierungen sollten in den Vergleichen mit den Fernerkundungssystemen ausgeklammert werden, beziehungsweise sollten Korrekturalgorithmen eingeführt werden. Dazu werden die Messungen mit dem Taupunktspiegel-Hygrometer Schneewittchen behilflich sein.

Die Feuchtigkeitsmessungen des untersuchten Radiometers kommen denjenigen der Sonden in den Fällen mit einer einfachen Feuchteschichtung nahe (vgl. Graphik unten links in der Abbildung 1). Bei tiefer Stratusdecke wird diese – inklusiv Höhe - durch das Radiometer qualitativ relativ korrekt angedeutet (s. insbesondere die zwei oberen Graphiken). Sobald geschichtete Wolken im mittleren und/oder oberen Stockwerk der Troposphäre vorhanden sind, kann das Radiometer diese nicht auflösen und glättet folglich das Vertikalprofil stark (s. insbesondere Graphik in der Mitte links, sowie obere Graphik links).

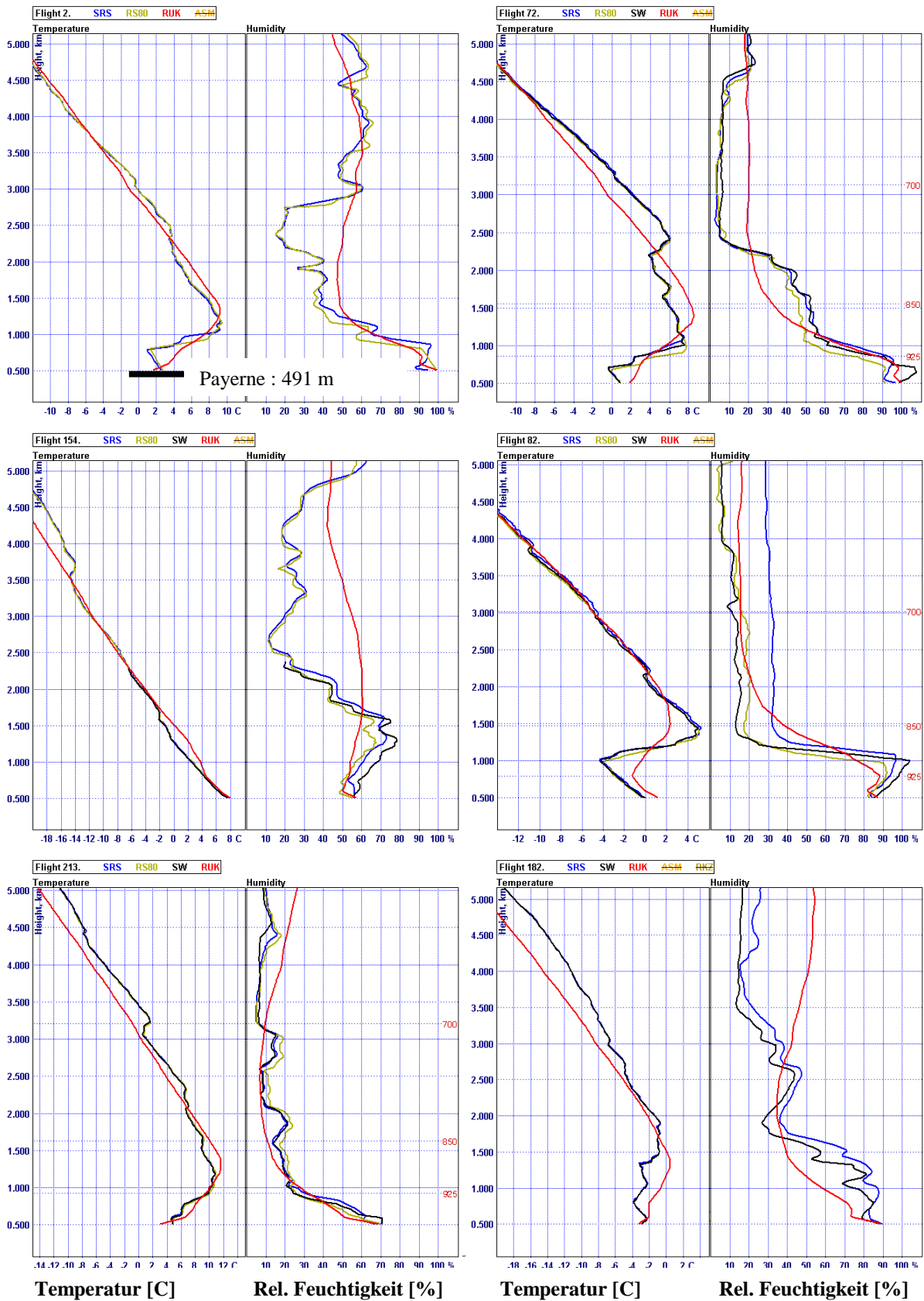


Abbildung 1. Vergleiche zwischen den Vertikalprofilen der Temperatur (Grad C) und der relativen Feuchtigkeit (%), welche einerseits durch zwei bis drei Radiosonden und andererseits durch das TV/WVP-3000 Mikrowellen Radiometer gleichzeitig gemessen wurden. Sechs beispielhafte Fälle werden vorgestellt. Die Graphiken sind auf die ersten 5 km beschränkt. Messsysteme : SRS400 (blau), RS80 (gelb), Schneewittchen SW (schwarz) und TP/WVP-3000 mit dem Kürzel RUK (rot).

Diese qualitativen Falluntersuchungen zeigen die Möglichkeiten und Grenzen des TPWVP-3000 Radiometers auf. Die zwei anderen beteiligten Mikrowellen Radiometer (s. Tabelle 1) haben den operationellen Betrieb in der TUC-Messkampagne nur während einer beschränkter Zeit erreicht und werden deshalb in dieser Untersuchung nicht eingeschlossen.

4 STATISTISCHE ANALYSE

Der statistische Vergleich der gleichzeitig geflogenen SRS und RS80 Sonden bezüglich Temperaturen (neun Sondierungen) zeigt mittlere Abweichungen zwischen 0 und 0.2 Grad C je nach Höhe zwischen Boden und 10 km. Dabei ist die Temperatur der RS80 die höhere. Dieser Unterschied könnte zu einem namhaften Teil von den unterschiedenen Strahlungskorrekturen herrühren. Die Standardabweichung ist ziemlich konstant im genannten Höhenbereich und liegt zwischen 0.15 und 0.2 Grad Celsius.

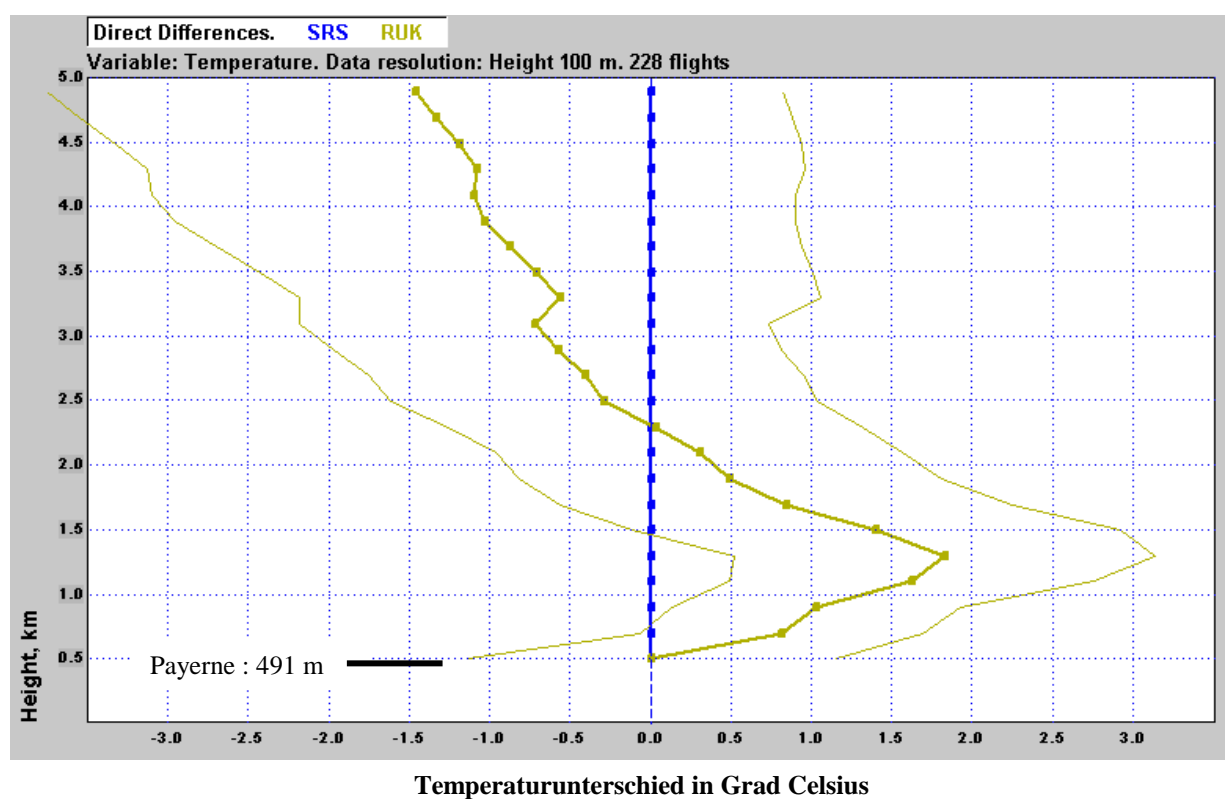


Abbildung 2: Mittlerer Temperaturunterschied zwischen dem TP/WVP-3000 Radiometer und der SRS Sonde (fette Kurve, in Grad C) zwischen Boden und 5 km Höhe, sowie \pm seine Standardabweichung (dünne Kurven). Die Temperatur der SRS Sonde wird dabei als « Referenz » angenommen. Der unterliegende Datensatz fasst 228 Sondierungen und die gleichzeitigen Profile des Radiometers.

Die Abbildung 2 zeigt den entsprechenden Vergleich zwischen dem TP/WVP-3000 Radiometer und der SRS Sonde. Die Auflösung der Sondenprofile wurde auf 100 m reduziert, sodass im ersten km über Boden der Schichtwert des Radiometers jeweils nur mit einem Punkt der Sonde verglichen wird. Die starke Höhenabhängigkeit der mittleren Abweichung in der Grundschicht bedeutet, dass die mittleren Temperaturgradienten der beiden Systeme dort bedeutend voneinander abweichen. Die mittlere Temperatur-Abweichung ändert sein Vorzeichen bei ca. 0.8 km über Boden. In der mittleren Troposphäre lieferte das Radiometer um 1.5 Grad C kältere Temperaturen als die Sonde. Die

Standardabweichung der Unterschiede zwischen beiden Messsystemen nimmt zwischen Boden und 5 km Höhe von 1 bis 2.5 Grad Celsius zu.

Nater (2004) hat die Temperaturinversionen untersucht. Dafür hat er Inversionen mit einer Temperaturzunahme von mindestens einem Grad Celsius und einer oberen Grenze unterhalb von 2.5 km/Meer betrachtet, dies anhand der Radiosondierungen. Das TP/WVP-3000 Radiometer hat alle Bodeninversionen dieser Aufzählung erkannt, doch öfters mit einer übertriebenen Schichtdicke. Das Radiometer hat ca. 30% der Höheninversionen eruiert, es hat jedoch nie eine Inversion mit einer Basis oberhalb von 1.5 km/Boden detektiert.

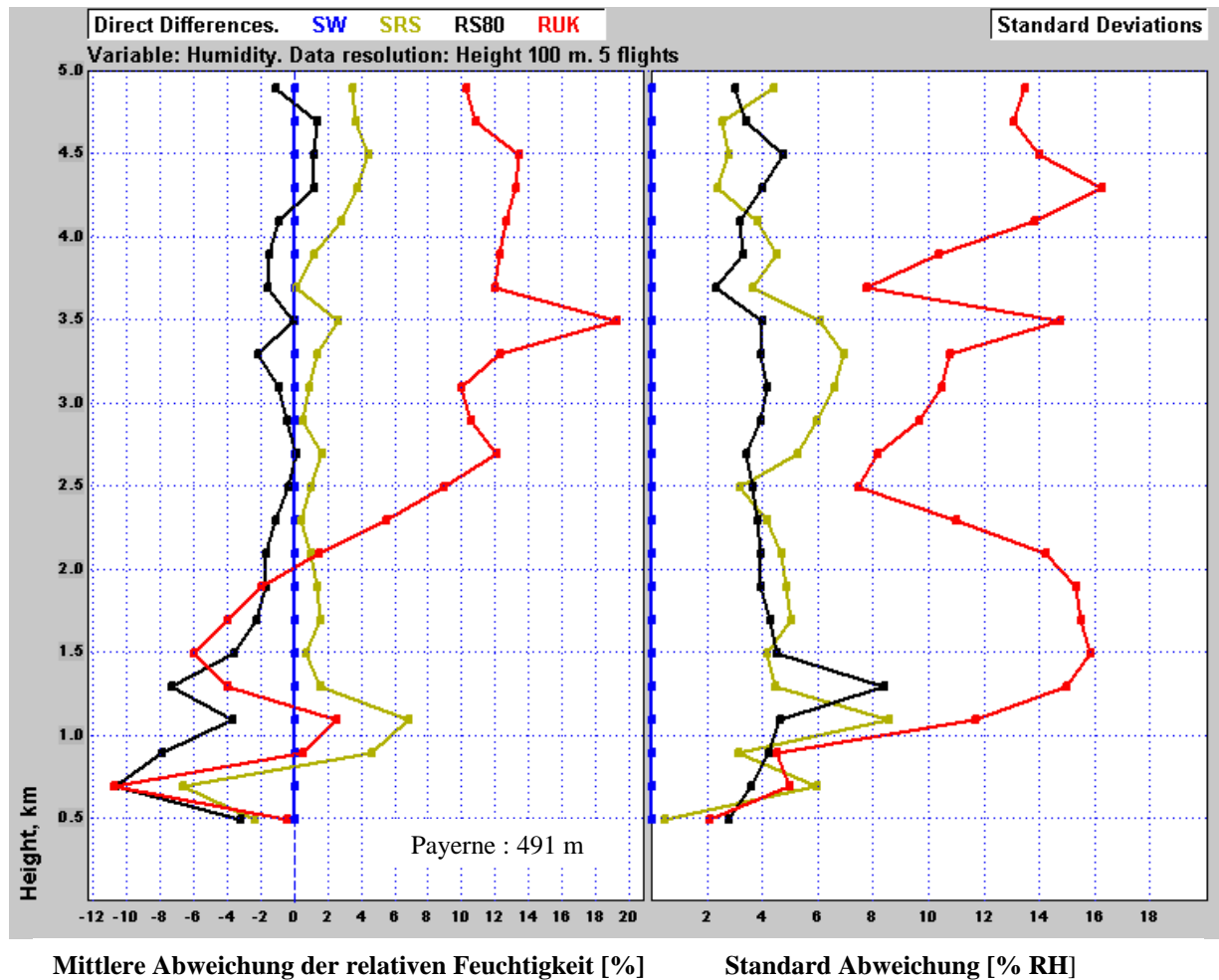


Abbildung 3: Mittlere Unterschiede der relativen Feuchtigkeit gegenüber dem Taupunktspiegel-Hygrometer Schneewittchen («Referenz»), sowie entsprechende Standardabweichungen. Diese Statistik stützt sich auf fünf Dreifach-Sondierungen und auf die gleichzeitigen Messungen des TP/WVP-3000 Radiometers. Sippican Hygristor: gelbe Profile, Vaisala Humicap A: schwarze Profile, TP/WVP-3000 (RUK): rote Profile.

Wie schon angedeutet, sind die Feuchtigkeitsvergleiche mit Vorsicht anzugehen: erstens bei der Definition der Referenzwerte, dann bei den Vergleichen selbst. Gründe dafür sind in den messtechnischen Schwierigkeiten, der starken Heterogenität des Feuchtfeldes, sowie dem Sättigungsübergang (über Wasser, bzw. über Eis) zu suchen. Weiter misst das Radiometer die Feuchtigkeit als spezifische Feuchte, welche mit Hilfe der Temperatur in relative Feuchtigkeit umgewandelt wird.

Die Abbildung 3 vergleicht alle eingesetzten Sensoren während fünf Dreifach-Sondierungen. Dabei wurde die Sondierung Nr. 82 auf Abbildung 1 ausgeschlossen, wo der Sippican Hygristor auf etwa konstanter Luftfeuchtigkeit oberhalb der Stratusdecke eingefroren ist. Im ersten Kilometer über Boden sind die Abweichungen zwischen den drei Sonden einerseits durch die Mitberücksichtigung der Wassertröpfchen durch das Taupunktspiegel-Hyrometer ($RH > 100\%$), andererseits durch die Unterschätzung der Hygristoren in der Sättigungsnähe geprägt. Zwischen 1.5 und 5 km Höhe stimmen die Sondensensoren recht gut überein (vgl. die mittlere Abweichung und die Standardabweichung in der Abbildung 3). Klar unterscheidet sich das Radiometer von den Sonden oberhalb der Grundschicht. Es misst dort einen um ca. 12% relative Feuchtigkeit höheren Wert als die drei Sonden und sein statistischer Fehler schwankt zwischen 8 und 18% RH.

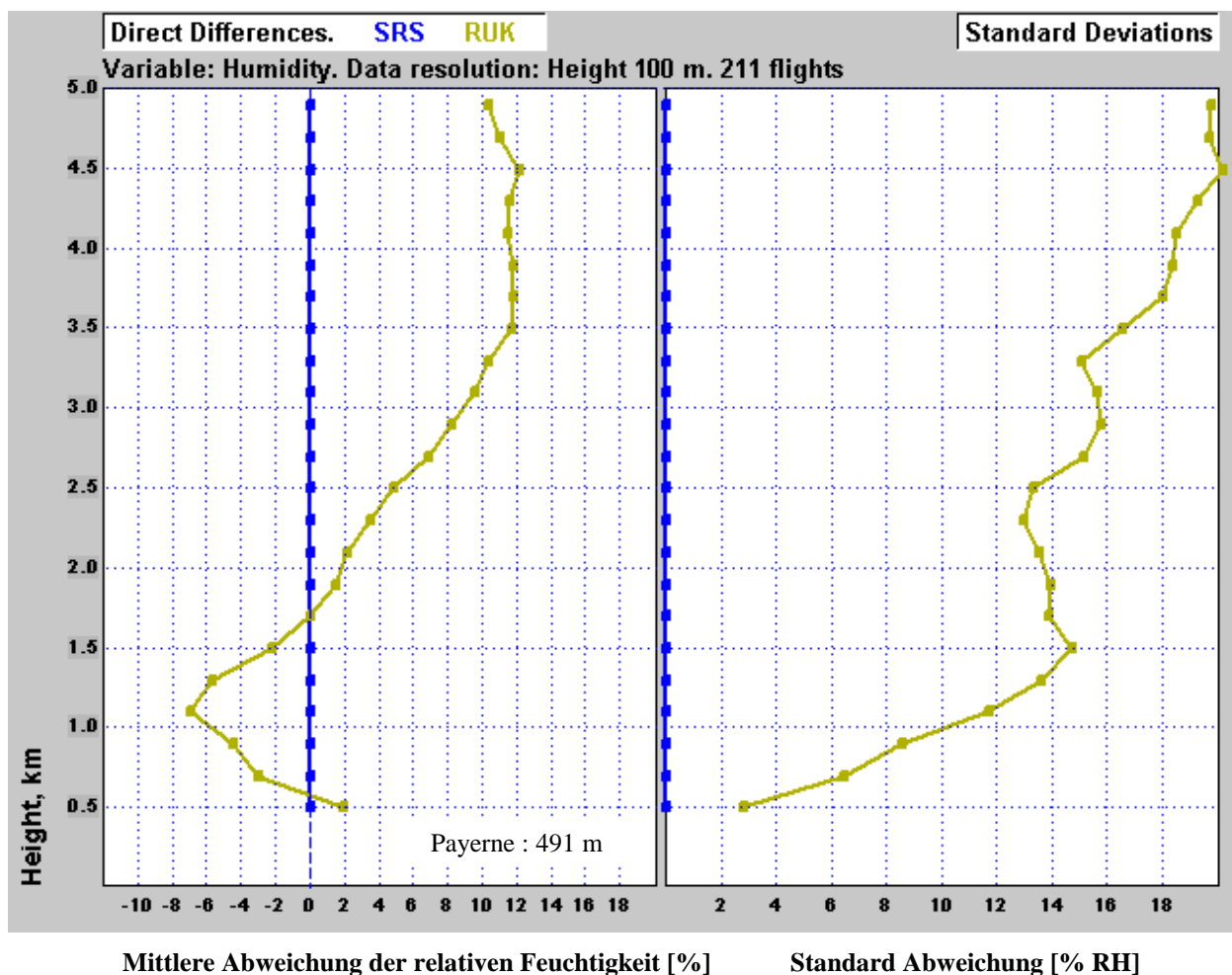


Abbildung 4: Mittlere Unterschiede der relativen Feuchtigkeit zwischen dem TP/WVP-3000 Radiometer und dem Sippican Hygristor der SRS Sonde zwischen Boden und 5 km Höhe, sowie seine Standardabweichung. Die SRS Sonde wird dabei als « Referenz » angenommen. Der unterliegende Datensatz fasst 211 Sondierungen und die gleichzeitigen Profile des Radiometers TP/WVP-3000.

Die in der Abbildung 3 gezeigten Ergebnisse bedürfen einer Bestätigung, da die benutzte Stichprobe von fünf Fällen, bei denen drei Hygrometer eingesetzt wurden, keine statistisch signifikanten Resultate zulässt. Für den Vergleich mit Hygristor der SRS-Sonde steht jedoch ein Datensatz von 211 Sondierungen zur Verfügung, nachdem diejenigen SRS-Profile mit konstanter Luftfeuchtigkeit oberhalb der Stratusdecke ausgeschlossen wurden (wie z. B. die Sondierung 82 auf Abbildung 1). Die gelben

Kurven der Abbildung 4 sind mit den roten der Abbildung 3 zu vergleichen. Die Abbildung 4 bestätigt im Allgemeinen die Resultate aus der Abbildung 3. Oberhalb von 2.5 km/Boden weicht die Luftfeuchtigkeit des Radiometers stark von derjenigen der Sonden ab, sowohl bezüglich der systematischen Abweichung als auch der Streuung um die mittlere Differenz. Definitive Resultate im ersten km/Boden bedürfen noch einer detaillierten Korrektur der Sondenmessungen, um über den bestmöglichen „Referenz“-Datensatz verfügen zu können.

5 SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Bezüglich Temperatur sind die drei eingesetzten aerologischen Systeme gleich gut für die Validierung der Mikrowellen Radiometer. Die häufig aufgetretenen Temperaturinversionen erlauben diesbezüglich aufschlussreiche Resultate. Temperaturunterschiede zwischen dem Mikrowellen Radiometer TP/WVP-3000 und den 3 Sondentypen sind bedeutend grösser als diejenigen zwischen den verschiedenen Sonden. Die Bodeninversionen werden durch das Radiometer recht gut erkannt, Höheninversionen jedoch seltener.

Eine genaue Messung der Luftfeuchtigkeit ist schwieriger als der Temperatur. Die Sondenresultate bedürfen noch einer Detailkorrektur ihrer bekannten systematischen Fehler, um den bestmöglichen Vergleichsdatensatz für die Radiometer zu erhalten. Obwohl das Mikrowellen Radiometer TP/WVP-3000 die starken Feuchte-Abnahmen oberhalb tiefer Nebeldecken und die Hauptmerkmale der Feuchtigkeitsprofile aufzuzeigen vermag, bleibt sein Messfehler für die relative Feuchtigkeit beträchtlich.

Das Zusammenbringen von Radiometersystemen mit aktiven Fernerkundungsgeräten am selben Ort (Windprofiler, Wolkenradar) soll künftig Verbesserungen in der Fernerkundungstechnologie erbringen, sowohl für die Temperatur wie für die Feuchtigkeit.

Die Resultate solcher Vergleiche zwischen Radiosondierungen und Fernerkundungssystemen sollen nicht alleine bei der Bewertung dieser neueren Technologie berücksichtigt werden. Die Bedürfnisse der numerischen Wettervorhersagemodelle müssen hinzugezogen werden, sowohl bezüglich vertikaler Auflösung wie auch bez. zeitlicher Auflösung. Je nach Endanwendung können diese Bedürfnisse auch unterschiedlich festgelegt werden.

LITERATUR

- Fujiwara, M., Shiotani, M., Hasebe, F., Vömel, H., Oltmans, S.J., Ruppert, P., Horinouchi, T, and Tsuda., T. (2003). *Performance of the Meteorolabor „Snow White“ chilled-mirror hygrometer in the tropical troposphere: comparison with the Vaisala RS80 A/H-Humicap sensors*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1534–1542.
- Miloshevich, L.M., Vömel, H., Paukkunen, A.J., and Oltmanns, S.J. (2001). *Characterization and correction of relative humidity measurements from Vaisala RS80-A radiosondes at cold temperatures*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, pp. 135–155.
- Nater, R. (2004). Validation of microwave radiometer temperature and humidity profiles with aerological soundings. Diploma thesis. Dep. of physics. University of Fribourg. 82 p.
- Richner, H., et al. (eds. (1999), *Grundlagen aerologischer Messungen speziell mittels der Schweizer Sonde SRS-400*, Veröffentlichungen der SMA-MeteoSchweiz Nr. 61, Dezember 99, 125-132.
- Ruffieux, D., und Joss, J. (2003). *Influence of Radiation on the Temperature Sensor Mounted on the Swiss Radiosonde*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, No. 11, pp. 1576–1582.
- Ruffieux D., Hewison, T.J., Gaffard, C., Nater, R., Andrade, B., Perroud, M., Berger, H., and Overney, P.(2004). *The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign : TUC*. MICRORAD04, Rome, Italy, 23-27 February, 2004

- Schmidlin, F. J., und Ivanov, A. (1998). *Radiosonde relative humidity sensor performance: The WMO intercomparison-Sept. 1995, Preprint volume. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Amer. Meteor. Soc., 68-71, 1998.
- Vömel, H., Fujiwara, M., Shiotani, M., Hasebe, F., Oltmans, S.J., und Barnes, J.E. (2003). *The Behavior of the Snow White Chilled-Mirror Hygrometer in Extremely Dry Conditions*, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 20, No. 11, pp. 1560–1567, 2003.
- Wang, J., Carlson, D.J., Parsons, D.B., Hock, T.F., Lauritsen, D., Cole, H.L., Beierle, K., and Chamberlain, E. (2003). *Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 16, 1860, doi:10.1029/2003GL016985.
- Ware, R., Carpenter, R., Güldner, J., Liljegren, J., Nehr Korn, T., Solheim, F., and Vandenberghe, F. (2003): *A multi-channel radiometer profiler of temperature, humidity and cloud liquid*, *Radio Science*, 38, 8079-8032.