

No. 170

THYGAN

Benützerinformationen und -erfahrungen

Beiträge zum Kolloquium "Automatische Messnetze SMA"
vom 22. Mai 1992 in Zürich

von

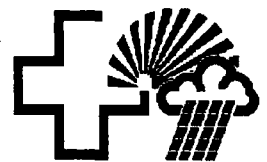
R. Dössegger, G. Haller, B. Hoegger, J. Joss, G. Müller, G. Pilet,
P. Wasserfallen, P. Zbinden, alle SMA
und
P. Ruppert, METEOLABOR

März 1992

Thermo-Hygrometer

551.508.29 : 551.508.79

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**



THYGAN

Benützerinformationen und -erfahrungen

Beiträge zum Kolloquium "Automatische Messnetze SMA"
vom 22. Mai 1992 in Zürich

von
R. Dössegger, G. Haller, B. Hoegger, J. Joss, G. Müller, G. Pilet,
P. Wasserfallen, P. Zbinden, alle SMA
und
P. Ruppert, METEOLABOR

März 1992

Thermo-Hygrometer

551.508.29 : 551.508.79

Zusammenfassung

Das Thermo-Hygrometer ANETZ (THYGAN) ist das jüngste und zugleich modernste der im automatischen Beobachtungsnetz SMA (ANETZ) eingesetzten Messinstrumente. Es lässt sich beschreiben als geheizte, künstlich belüftete Spezialwetterhütte mit Taupunktspiegel-Feuchtemessung und Thermoelement-Temperaturmessung. Im vorliegenden Bericht werden neben ersten Erfahrungen aus Sicht der Datenbenützer auch die physikalischen Grundlagen zum Verständnis des Messprinzips dargestellt. Die national und international verfügbaren Auswertungen belegen die grosse Betriebssicherheit des neuen Instrumentes bei jeder Witterung; über die Aussagekraft der Messdaten selbst sind die Erfahrungen hingegen noch vergleichsweise klein. In Zukunft könnte das THYGAN auch in neuen Anwendungsgebieten, z.B. für die Beurteilung von Bewölkungsverhältnissen, an Bedeutung gewinnen.

Résumé

Le Thermo-hygromètre THYGAN est le plus jeune et le plus évolué des instruments de mesures du réseau ANETZ de l'ISM. THYGAN est constitué d'un abri chauffé et ventilé qui contient les systèmes de mesures de la température de l'air (thermocouple) et de son point de rosée (miroir). Le présent rapport décrit, d'une part, les bases physiques et les principes de mesure du THYGAN, et d'autre part, les premiers résultats obtenus ainsi que les premières analyses des utilisateurs des données. Les rapports des tests et comparaisons nationales et internationales démontrent les performances optimales de l'instrument de

même que sa grande fiabilité d'exploitation par tous les temps. Quant à la portée des mesures THYGAN dans le cadre de la climatologie, il est encore trop tôt pour pouvoir en tirer des conclusions. Dans le futur, les informations du THYGAN pourraient prendre une importance accrue dans de nouveaux domaines d'applications tels que p.ex. l'appréciation des conditions nuageuses.

Riassunto

Il Termoigrometro THYGAN è il più recente ed il più evoluto degli strumenti di misura della rete ANETZ dell'ISM. Il THYGAN è composto da un involucro scaldato e ventilato che contiene i sistemi di misura della temperatura dell'aria (coppia termoelettrica) e del punto di rugiada (specchio). Questo rapporto descrive, da una parte, le basi fisiche ed i principi di misura del THYGAN, e dall'altra, i primi risultati ottenuti e le prime analisi degli utilizzatori dei dati. I rapporti degli esperimenti e dei paragoni nazionali ed internazionali dimostrano le prestazioni ottimali dello strumento e la sua grande attendibilità di funzionamento in tutte le condizioni climatiche. Nell'ambito della climatologia, è ancora prematuro trarre delle conclusioni sulla portata delle misure del THYGAN. Nel futuro, altre informazioni del THYGAN potrebbero assumere una certa importanza nei nuovi campi d'applicazione come per esempio l'apprrezzamento delle condizioni nuvolose.

Summary

The Thermo-Hygrometer ANETZ (THYGAN) is the latest and the most modern measuring instrument used in the observatory network SMA (ANETZ). One could describe it as heated, artificially ventilated special thermometer screen with capability of measuring dewpoint-humidity and thermoelement-temperature. The following report presents the initial experiences of the users of the data as well as fundamental physical understanding of the measuring principals. The national and international evaluations available vouch for the safe operation of this new instrument under all weather conditions, nevertheless the little experience gained so far with this instrument does not allow to definitively assess the quality of its measurements. In the future the THYGAN could find use in new applications as for example in the reviewing of cloud conditions.

Vorwort

Das automatische Wetterbeobachtungsnetz (ANETZ) ist seit Anfang 80er Jahre das Basismessnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Es umfasst heute über 70 Stationen, die alle 10 Minuten rund 20 Messgrößen erfassen und die Messwerte im Echtzeitbetrieb über Telefonmitleitungen an eine Netzzentrale (AZEN) übermitteln. Das ANETZ und seine Messinformationen sind in mehreren Publikationen dokumentiert, u.a. in SMA (1980), G. Müller (1982), SMA (1985), Th. Gutermann (1986).

Lufttemperatur und -feuchtigkeit gehören zu den wichtigsten und meistverwendeten Größen des ANETZ-Messprogrammes. Entsprechend gross waren die Bemühungen der SMA, für die Messungen möglichst betriebssichere und an allen Stationsstandorten verwendbare Messinstrumente zu entwickeln und einzusetzen. Das jüngste und zugleich modernste ANETZ-Meßinstrument ist das Thermo-Hygrometer ANETZ (THYGAN). Es war Gegenstand eines speziellen SMA-Projektes (G. Haller und G. Müller, 1989) und entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Meteolabor AG, Wetzikon. Die allgemeinen Grundlagen der Feuchtemessung und die gerätetechnischen Erkenntnisse wurden im Rahmen der wissenschaftlichen Kolloquien SMA aufbereitet und vorgestellt (J. Joss und Th. Gutermann, 1981, 1982-84).

Hergestellt und auf dem Markt vertrieben wird das Gerät durch Meteolabor AG. Es ist seit Anfang 1991 als offizielles Temperatur- und Feuchtemessgerät der SMA im operationellen ANETZ-Betrieb. Ausserhalb des ANETZes stand das THYGAN auch während mehreren Jahren im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes zur Untersuchung von Waldschäden und Luftverschmutzung (NFP14+) im Einsatz. Im weiteren sorgt es im nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) des BUWAL und an Grundschichtstationen des automatischen Ergänzungsnetzes (ENET) der SMA für die Temperatur- und Feuchtemessungen.

P. Ruppert (1991) hat Funktion und Technik des THYGANs in einem ersten SMA-Arbeitsbericht beschrieben. Der vorliegende zweite Arbeitsbericht soll ergänzende Erfahrungen und Informationen aus der Sicht des Datenbenützers vermitteln. Die Kenntnisse im Umgang mit dem neuen Messinstrument sind noch jung, jedoch rasch am Wachsen. Dieser Bericht ist ein weiterer Beitrag, um entsprechende Erfahrungen auch einer breiteren Öffentlichkeit zu erschliessen.

Für die Erarbeitung des Berichts sorgte ein Kollektiv von vorwiegend SMA-internen Datenbenützern. Der Unterzeichnete wurde bei den Redaktionsarbeiten wirkungsvoll unterstützt durch V. Rocha und D. Wolf. Viele unpublizierte interne Detailuntersuchungen kleineren Umfangs sind, wie für die übrigen ANETZ - Messinstrumente, auch für das THYGAN in einer SMA-Gesamtdokumentation (Charakteristik von ANETZ-Daten "CHARAN") enthalten und bei der Sektion Daten an der SMA in Zürich zugänglich.

SMA - Abteilung Messsysteme und Daten

G. Müller

Inhaltsverzeichnis	
1.	Das Projekt THYGAN (G. Haller) 1
1.1	Zweck des Projekts 1
1.2	Projekttablauf 2
1.3	Aufwand für das Projekt 2
1.4	Datum der Inbetriebnahme des THYGAN im ANETZ 3
2.	Physikalische Grundlagen zum Verständnis der THYGAN-Messungen (J. Joss, P. Wasserfallen) 5
2.1	Temperaturmessung, Strahlungs- und Grenzschichtfehler..... 5
2.1.1	Rückblick und Messprobleme 5
2.1.2	Grenzschichtprobleme 5
2.1.3	Gewählte Lösung 6
2.2	Einige Begriffe zur Beschreibung der Luftfeuchtigkeit 6
2.2.1	Dampfdruck über Eis und Wasser..... 6
2.2.2	Taupunkt und Frostpunkt 7
2.2.3	Relative Feuchte 7
2.2.4	Psychrometertemperatur..... 8
2.3	Prinzip des Taupunktspiegels 8
2.3.1	Mechanischer Aufbau..... 8
2.3.2	Spiegelreinigung..... 9
2.3.3	Einlaufvorgang (Einstellzeit) beim Taupunktspiegel..... 10
2.3.4	Wasser/Eis-Unterscheidung auf dem Spiegel..... 11
2.3.5	Mittelwertbildung THYGAN 11
2.4	Spezielle Probleme im Gebirge..... 11
2.4.1	Problemstellung..... 11
2.4.2	Massnahmen..... 11
2.4.3	Korrekturmöglichkeiten..... 12
2.5	Neue Anwendungen..... 13
2.5.1	Erfassung von Strahlungsvorgängen 13
2.5.2	Detektion von Nebel..... 13
3.	Instrumentelle Modifikationen und ihr Einfluss auf das Datenmaterial der ersten Betriebsjahre (P. Ruppert Meteolabor AG, J. Joss) 15
3.1	Prototypen..... 15
3.2	Vorseriegeräte..... 15
3.3	Seriegeräte..... 16
4.	Verarbeitung der Daten (G. Haller, R. Dössegger) 17
4.1	Aufteilung der Verarbeitungsschritte..... 17
4.2	Verarbeitung im Messinstrument 17
4.2.1	Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit 17
4.2.2	Statuswort 17
4.2.3	Datenübermittlung 18
4.3	Verarbeitung in der Netzzentrale 18
4.3.1	Berechnung der relativen Feuchtigkeit..... 19
4.3.2	Berechnung des Dampfdrucks..... 19
4.3.3	Berechnung der Taupunkttemperatur..... 19
4.3.4	Berechnung der Psychrometertemperatur 20
4.3.5	Auswirkungen des Statuswortes auf die Daten..... 20
4.4	Verarbeitung im Datenbankrechner METEOR..... 21
5.	Comparaison du THYGAN avec d'autres Instruments 22
5.1	Expériences d'exploitation (G. Haller, G. Pilet)..... 22
5.1.1	Statistique de l'adresse de contrôle 22
5.1.2	Statistique des pannes 22

5.2	Temperatur.....	25
5.2.1	Comparaison sur le terrain d'essais SAP/ENV (P. Wasserfallen).....	25
5.2.2	Erfahrungen im ANETZ (P. Zbinden, G. Haller).....	28
5.3	Humidité.....	38
5.3.1	Comparaison sur le terrain d'essais SAP/ENV (P. Wasserfallen).....	38
5.3.2	Erfahrungen im ANETZ (R. Dössegger).....	42
6.	THYGAN im Internationalen Vergleich: WMO-Hygrometervergleich Oslo 1986-1989 (B. Hoegger)	47
6.1	Rahmenbedingungen.....	47
6.1.1	THYGAN im Umfeld der "WMO International Hygrometer Intercomparison" in Oslo von 1986 -1989.....	47
6.1.2	Referenz-Messgeräte.....	47
6.1.3	Aufstellung der THYGANs.....	48
6.2	Resultate.....	48
6.2.1	THYGAN-Messwerte und ihre Genauigkeit im Quervergleich.....	48
6.2.2	Unterhaltsarbeiten an den THYGAN-Messgeräten.....	52
6.2.3	Hygrometervergleich beim Deutschen Wetterdienst (DWD).....	52
6.2.4	Schlussbetrachtungen.....	52
7.	Engagement du THYGAN dans le PNR14+ (P. Wasserfallen)	53
8.	Schlussfolgerungen und Ausblick (G. Müller)	57
8.1	Eigenschaften THYGAN.....	57
8.2	Offene Fragen.....	57
8.3	Ausblick.....	58
9.	Quellenverzeichnis (R. Dössegger)	59

1. Das Projekt THYGAN (G. Haller)

1.1 Zweck des Projekts

Bei der Realisierung des ANETZ wurden als Feuchtemessgerät das Haarhygrometer der Firma Lambrecht, Typ 800L100, und als Thermometer das ventilierte Thermometer der Firma Meteolabor, Typ VHT1, installiert.

Während der ersten Betriebsjahre traten vor allem bei der Feuchtemessung im Gebirge, aber auch bei extremeren Witterungssituationen im Flachland, verschiedene Probleme auf, die zum Teil relativ lange Perioden mit Fehlmessungen nach sich zogen.

Die wesentlichsten Schwierigkeiten waren:

- Temperaturunterschied zwischen den Haaren und dem Thermometer im Strahlungsschutz führt zu ungenauen relativen Luftfeuchtigkeiten (im allgemeinen zu tiefe Werte)
- Tau, Schnee und Eis im Strahlungsschutz führen zu überhöhten Feuchtemesswerten, insbesondere bei starker Einstrahlung
- Blockierung des Messwerkes bei Vereisung
- Unzuverlässigkeit der Hygrometereichung, da das Erreichen von Sättigungsbedingungen einen Langzeitprozess darstellt, der im Freien relativ schwer realisiert werden kann.

Auch die Temperaturmessung mit dem ventilerten Thermometer VHT1 erwies sich an Gebirgsstandorten als fehleranfällig. Die wesentlichsten Probleme waren hier:

- zu hohe Messwerte wegen Strahlungseinflüssen, vor allem bei geringen Windgeschwindigkeiten
- zu hohe Messwerte, wenn durch hohe Windgeschwindigkeiten der Luftström im Messkanal umgekehrt wird
- zu tiefe Messwerte wegen Benetzung der Messperle bei Regen und Starkwinden (Psychrometer-effekt).

Speziell um die Probleme der Feuchtemessung zu studieren, wurde Ende 1981 eine Arbeitsgruppe gebildet. Die ersten Abklärungen dieser Gruppe führten zum Projekt THYGAN, dessen Ziel es war, die Probleme der Feuchtemessung und der Temperaturmessung mit einem einzigen neuen Gerät zu lösen. Als wesentliche Vorgabe musste das neue Meßsystem auch unter den im Hochgebirge auftretenden Witterungsbedingungen funktionstüchtig bleiben und wesentlich bessere Temperatur- und Feuchtigkeitswerte liefern.

Das Projekt konnte auf Grundlagenarbeiten der Firma Meteolabor und der SMA an Taupunktmessgeräten aufbauen. Es schloss die Prototypenentwicklung, die Härtung für den operationellen Feld-einsatz sowie die Ausrüstung des gesamten ANETZes mit ein.

1.2 Projektablauf

Im folgenden wird der chronologische Ablauf des Projektes festgehalten:

- 1981 Die Betriebsgruppe ANETZ (BAN) beschliesst im Rahmen eines Projektes, Lösungen für die Probleme der Feuchtemessung zu suchen.
- 1982 Start des Projekts "THYGAN". Erstellung eines Pflichtenheftes
Bestellung von drei Prototypen, Entwicklung in Zusammenarbeit von Meteolabor und SMA
- Winter 82/83 Laboruntersuchungen und erste Feldtests mit Prototypen in Payerne, Locarno und auf dem Säntis
- 1983 Bestellung von 4 Vorseriegeräten und Auftrag zur Modifikation der drei Prototypen
- 1984 Weitere Feldtests mit Vorseriegeräten und modifizierten Prototypen in Payerne, Locarno sowie auf dem Säntis, Moléson, Chasseral und Jungfrauoch.
Beschluss weiterer Modifikationen
Bestellung von 22 Geräten (1. Serie)
- Sommer 85 Installation der ersten Seriegeräte im ANETZ. Sofortige Verwendung von THYGAN als offizielles Hygrometer ANETZ.
Beschaffung von THYGAN für Waldschadenstationen
- 1986 Anpassung der Gerätesoftware
- 1986-89 THYGAN nimmt an "WMO International Hygrometer Intercomparison" in Oslo teil. (2 Geräte)
- 1987 Bestellung von 54 Geräten (2. Serie)
- Sommer 87 Rücknahme und Modifikation der Geräte aus Versuchsbetrieb und 1. Serie. Weiterausrüstung des ANETZ; im Juni 1988 ist an allen Stationen ein THYGAN installiert
- 1989 Abschluss Projekt THYGAN
- 01.01.91 Einführung von THYGAN als offizielles Thermometer im ganzen ANETZ

1.3 Aufwand für das Projekt

Das Projekt THYGAN wurde von der SMA in enger Zusammenarbeit mit Meteolabor AG realisiert. Der personelle Aufwand der SMA ist nicht im Detail dokumentiert, wesentliche Beiträge wurden jedoch in folgenden Bereichen geleistet:

- Mitarbeit bei der technischen Entwicklung und Verbesserung des Gerätes
- Versuche mit Gehäuseform, Evaluation geeigneter Ventilatoren
- Tests in der Klimakammer und auf dem Versuchsmessfeld
- Durchführung von Feldtests an verschiedenen Standorten, Auswertung der Resultate
- Teilnahme an internationalen Vergleichskampagnen
- Erstellung von Dokumentationen

Für die Entwicklung und den Einkauf der Geräte wurden folgende Mittel aufgewendet:

1982:	Entwicklung und Herstellung von drei Prototypen	Fr. 65'500.-
1983:	Beschaffung von 4 Vorseriegeräten, Modifikation der Prototypen	Fr. 50'500.-
1984:	Beschaffung der 1. Serie, 22 Geräte	Fr. 205'000.-
1985:	Beschaffung von 4 Geräten für Waldschadenstationen, sowie von Reserve- und Testmaterial	Fr. 80'000.-
1986/87/88:	Beschaffung der 2. Serie, 54 Geräte	Fr. 504'000.-
	Total	Fr. 905'000.-

1.4 Datum der Inbetriebnahme des THYGAN im ANETZ

Die untenstehende Liste gibt die Inbetriebnahme der jeweiligen Version an den einzelnen Stationen an. Ab 1. Serie-Version stehen die Daten kontinuierlich zur Verfügung, bei Prototypen und Vorserie sind Unterbrüche in den Datenreihen möglich.

Die Meteostationen bei Kernkraftwerken (Nr. 55, 60, 61, 64, 72) sind nicht mit THYGAN ausgerüstet.

Nr.	Name	Prototyp Version 1 ¹⁾	Vorserie Version 2 ²⁾	1. Serie Version 4 ³⁾	2. Serie Version 7 ⁴⁾
01	La Dôle			14.10.85	08.01.88
02	Payerne	06.01.83	03.04.85	24.07.85	18.08.87
03	Jungfraujoch		29.05.84	10.10.85	03.11.87
04	Wynau			09.10.85	23.10.87
05	Säntis	04.03.83	11.02.84	11.10.85	11.11.87
06	Vaduz				04.05.88
07	Aigle				20.01.88
08	Moléson		08.06.84	10.09.85	02.02.88
09	Fahy				24.03.88
10	Montana			23.08.85	05.11.87
11	Zermatt			02.10.85	30.10.87
12	Chasseral		24.05.84	28.08.85	11.12.87
13	Pilatus			08.08.85	18.08.87
14	Altdorf				27.05.88
15	Ulrichen			01.10.85	04.11.87
16	Plotta				04.08.88
17	Lugano				23.03.88
18	Samedan			05.11.85	07.12.87
19	Chur				04.05.88
20	Napf			15.10.85	06.01.88
21	Sion				20.01.88
22	Magadino				25.03.88
23	Neuchâtel				11.03.88
24	Stabio				01.07.87
25	Interlaken				16.02.88
26	Disentis				26.05.88
27	Hinterrhein			07.11.85	01.12.87
28	Davos			21.10.85	27.10.87
29	St. Gallen				05.05.88
30	Glarus				17.06.88
31	Genève				12.02.88
32	Kloten			12.12.85	02.11.87
33	Gütsch			09.08.85	07.10.87
34	Pully				05.02.88
35	Gr.St.Bernard			13.09.85	06.07.87
36	Adelboden				16.02.88
37	Visp				20.01.88
38	La Chaux-de-Fonds				11.03.88
39	Rünenberg				24.03.88
40	Buchs-Suhr				23.02.88

Nr.	Name	Prototyp Version 1 ¹⁾	Vorserie Version 2 ²⁾	1. Serie Version 4 ³⁾	2. Serie Version 7 ⁴⁾
41	Luzern				16.03.88
42	Engelberg				17.06.88
43	Schaffhausen				23.06.88
44	Zürich-SMA			26.07.85	02.11.87
45	San Bernardino			07.11.85	01.12.87
46	Weissfluhjoch			22.10.85	27.10.87
47	Corvatsch			06.11.85	29.12.87
48	Basel				24.03.88
49	Robbia				25.05.88
50	Scuol				24.05.88
51	Changins				04.02.88
52	La Frétaz			02.08.85	24.10.87
53	Bern				15.12.87
54	Güttingen				05.05.88
56	Wädenswil				17.06.88
57	Tänikon				02.03.88
58	Reckenholz				22.06.88
59	Locarno-Monti	13.12.83	14.01.84	06.12.85	02.12.87
62	Cimetta				24.03.88
63	Evolène			18.09.86	05.11.87
65	Fey				27.04.89
66	Grimsel				26.04.89
67	Comprovasco				11.12.87
68	Lägern				21.11.89
69	Hörnli				22.11.91
70	Plaffelen-Oberschrot				08.09.89
71	Robiel				11.04.91
72	PSI				29.11.91

1) Einsatz nicht kontinuierlich, verschiedene Versuchskennziffern.

2) Bei Säntis, Jungfrauojoch und teilweise Moléson zwei Geräte gleichzeitig im Einsatz. Standardkennziffern in dieser Phase sind Temperatur 35, Feuchtigkeit 36, Kontrollkennziffer 37.

3) Ab diesem Datum liefert THYGAN die offiziellen Feuchtwerte. Kennziffern: Temperatur 25, Feuchtigkeit 05, Kontrollkennziffer 20.

4) Hinweise auf Unterschiede der verschiedenen Versionen finden sich in Kapitel 3.

2. Physikalische Grundlagen zum Verständnis der THYGAN-Messungen

(J. Joss, P. Wasserfallen)

2.1 Temperaturmessung, Strahlungs- und Grenzschichtfehler

2.1.1 Rückblick und Messprobleme

Die beiden Originalinstrumente für die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung im ANETZ waren das ventilerte, geheizte Thermometer VHT1 (Meteolabor) und das Haarhygrometer im Strahlenschutzgehäuse (Lambrecht). Im Laufe der mehr als 10-jährigen Betriebszeit wurden an den beiden Instrumenten in bestimmten Situationen Fehlfunktionen und Messfehler beobachtet (vgl. Kap. 1.1):

1. zu hohe Temperaturwerte durch starke Winde, die den Luftstrom in die falsche Richtung zwingen (grobe sporadische Fehler) im VHT1
2. zu hohe Temperaturen durch unvollkommenen Strahlungsschutz
3. zu tiefe Temperaturen wegen Psychrometereffekt in Fällern, in denen die Heizung den Fühler nicht schnell genug trocknen kann im VHT1
4. Alterungsprobleme der Widerstandsperele in VHT1 und der Haare im Hygrometer
5. lange Blockierungen des Haarhygrometers in und nach Vereisungssituationen.

Diese Fehlfunktionen sind auf direkte und indirekte Strahlung, Verschmutzung und Vereisung, Gehäuse-temperatur, Wärmeleitung vom Gehäuse auf den Temperaturmessfühler (in Abhängigkeit von der Belüftungsgeschwindigkeit) und auf Messprobleme in der bodennahen und der sensoreigenen Grenzschicht von Temperatur und Feuchte zurückzuführen. Sobald beispielsweise das Gehäuse nass/vereist ist (durch Regen, Schnee oder Eis), und dieses Gehäuse auf irgend eine Weise (durch Strahlung oder Heizung) über den Taupunkt hinaus erwärmt wird, gibt es Wasserdampf an die Luft ab und verfälscht so die Feuchte der Luft. Ziel bei der Entwicklung des THYGAN war es, diese Fehler auf ein Minimum zu reduzieren und die verbleibenden Fehler auf bestmögliche Art zu korrigieren.

2.1.2 Grenzschichtprobleme

Falls zwischen der Luft und einem Objekt Temperaturunterschiede vorhanden sind, ändert die Temperatur meist nicht kontinuierlich (linear) von der Lufttemperatur im freien Raum zur Oberfläche des Objektes (Temperaturfühler, Erdoberfläche, etc): Die grössten Gradienten finden sich in der Nähe der Körperoberfläche, eben der Grenzschicht. Die Dicke der Grenzschicht nimmt mit der Wurzel aus der Dimension des Körpers (Dimension, d.h. Länge der Grenzschicht in Anströmrichtung) zu und mit der Wurzel der Windgeschwindigkeit ab und besitzt bei einem 10 cm grossen Objekt in einem 1.3 m/s Wind eine Grössenordnung von einem Millimeter. Weil sich auch an der Erdoberfläche eine Grenzschicht mit starken Gradienten ausbildet, stellt sich die Frage nach der repräsentativen Messhöhe über Boden. Bei ventilerten Geräten, die die Luft ansaugen, stellt sich diese Frage insbesondere in Situationen mit wenig Wind und starken vertikalen Gradienten, verursacht durch Sonneneinstrahlung am Tag oder Infrarotausstrahlung während einer klaren Nacht. Sie kann von ebenso grosser Bedeutung sein wie die Frage nach instrumentell bedingten Strahlungsfehlern und absoluter Präzision. In Payerne gemessene und ausgewertete Lufttemperaturen auf 2 m über Boden verglichen mit solchen von 10cm über Boden zeigen im Mittel über Tag und Nacht zwar einen verschwindend kleinen Temperaturgradienten. Die Streuung dagegen beträgt mehr als ein Grad pro Meter. Sie ist, wie erwartet, stark korreliert mit der Strahlung und auch abhängig von der Windgeschwindigkeit. Da Stationsverlegungen und Instrumentenwechsel auch Änderungen der (von der Windgeschwindigkeit abhängigen) repräsentativen Höhe mit sich bringen, wird es schwierig sein, Temperaturtrends von einigen Zehntelgraden aus vergangenen Messungen abzuleiten. Dasselbe gilt sinngemäss auch für Feuchtmessungen, doch ist hier wohl absolute Präzision, wenigstens im Moment, weniger gefragt.

2.1.3 Gewählte Lösung

Die Lufttemperatur wird zur Reduktion des Strahlungsfehlers im Innern eines Kanals gemessen. Während dies den Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung vollständig eliminiert, wird der Einfluss der durch den Boden reflektierten, indirekten Strahlung immerhin stark reduziert. Dies geschieht einerseits durch Beschränkung des Raumwinkels, in welchem das Thermometer den Boden sieht, und andererseits, indem das Luftthermometer klein ist und in ein gut reflektierendes, rostfreies Stahlrohr von 1.2 mm Durchmesser eingebaut wurde. Darin sind ein glasisoliertes Thermoelement und der Heizdraht aus Konstantan in einem Zweikomponenten-Harz eingegossen. Das Thermometerrohr ist an der Seitenwand des Ventilationskanals befestigt und wird, um es trocken und eisfrei zu halten, in den Pausen zwischen den Messungen geheizt. Die Kleinheit des Fühlers und die Stärke der Belüftung erlauben es, die Temperatur des Fühlers vor der Messung genügend rasch an die Lufttemperatur anzugleichen.

Das THYGAN misst die Feuchtigkeit auf der Basis des gekühlten, optisch kontrollierten Taupunktspiegels. Es wird also die Taupunkttemperatur gemessen und aus dieser (falls gewünscht) die relative Feuchtigkeit berechnet. Vorausgesetzt, es findet kein Verdampfen an nassen Gehäuseflächen statt, was durch eine geeignete Heizung vermieden werden kann, darf die Luft vor der Messung am Taupunktspiegel ohne Messfehler erwärmt werden. Dies ist ein grosser Vorteil gegenüber der Lufttemperaturmessung und derjenigen der relativen Feuchte (beispielsweise im Haarhygrometer). Lediglich die bereits erwähnte Benetzung/Vereisung durch Regen/Schnee oder Kondensation am Gehäuse kann zu Fehlern führen. Dies kann aber durch eine geeignete Heizung vermieden werden. Allerdings muss bei deren Dimensionierung auf den durch eine Erwärmung des Gehäuses resultierenden Fehler bei der Messung der Lufttemperatur geachtet werden. Mit andern Worten, die Stärke der Heizung stellt einen Kompromiss zwischen Temperatur- und Feuchtefehler dar.

Das Gerät benötigt keinen kurzfristigen Unterhalt und arbeitet mindestens 2 Jahre autonom (auch Taupunktspiegel!). Grosser Wert wurde neben einer guten Messleistung auf ein hohes MTBF (Mean Time Between Failures), eine gute Verfügbarkeit, sowie auf kleinen Stromverbrauch und Robustheit gelegt.

2.2 Einige Begriffe zur Beschreibung der Luftfeuchtigkeit

Eine einfache Einführung und Definitionen zum Thema Luftfeuchtigkeit finden sich in Liljequist und Cihak (1984).

2.2.1 Dampfdruck über Eis und Wasser

Ist der Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft (auch mit Dampfdruck bezeichnet) kleiner als der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck, ist die Luft ungesättigt. Ein Regentropfen wird in ihr verdampfen, während er in gesättigter Luft wasserdampfmassig im Gleichgewicht ist (also gleich viel Wasserdampf aufnimmt, wie er abgibt) und in übersättigter Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnimmt als er abgibt, somit wächst. Ganz wesentlich für den Niederschlagsprozess der normalerweise in unseren Breiten über die Eisphase ausgelöst wird, ist die Tatsache, dass der Sättigungsdampfdruck (PW) über Wasser grösser als derjenige über Eis (PE) ist. Tabelle 2.1 zeigt beide Grössen, zudem die Dampfdruckdifferenz $dP = PW - PE$ sowie die relative Feuchte UEW von über Eis gesättigter Luft in Bezug auf Wasser und UWE von über Wasser gesättigter Luft in Bezug auf Eis. Aus Tabelle 2.1 ist ersichtlich, dass bei Temperaturen zwischen -10 und -15 °C die Sättigungsdampfdruckdifferenz dP zwischen Wasser und Eis am grössten ist. Darum erwarten wir in diesem Temperaturbereich am meisten Vereisungen, wobei sich folgender Vorgang abspielt: Im unterkühlten Nebel steigt der Dampfdruck wegen der grossen Oberfläche aller Nebeltröpfchen auf den Sättigungswert über Wasser. Da dies über Eis bei $T = -10$ °C einer relativen Feuchte von 110.2% entspricht, befinden sich alle Eisoberflächen in einer übersättigten Atmosphäre. Sie setzen deshalb zusätzliches Eis an, wobei der Eisansatz umso rascher erfolgt, je stärker der Wind bläst. Um die Vereisung zu verhindern, muss man die relative Feuchte gegenüber allen Eisoberflächen unter 100% absinken lassen, was durch die Heizung sichergestellt werden soll. Dabei berücksichtigt der Faktor 0.9 (in Gleichung (1), Kapitel 2.4.2) die mittlere Dampfdruckdifferenz zwischen Eis und Wasser, und die additive Konstante von 4 Grad bildet eine Reserve für eventuelle ungünstige Temperaturgradienten um das Gehäuse und im Eisansatz.

Ihren maximalen Wert erreicht die Uebersättigung bezüglich Dampfdruckdifferenz, und damit Wachstumsgeschwindigkeit des Eisansatzes, bei ca. -12 °C mit ungefähr 0.3 hPa. Die sich in diesen Situa-

tionen ergebende Wachstumsrate des Eisansatzes kann nur noch durch das Einfangen der unterkühlten, in der Luft suspendierten Wassertröpfchen überboten werden.

T Temperatur (°C)	PW Sättigungs- dampfdruck über Wasser (hPa)	PE Sättigungs- dampfdruck über Eis (hPa)	dP Sättigungs- dampfdruck- differenz (PW-PE) (hPa)	UEW Relative Sättigungs- feuchte über Eis bezogen auf Wasser (%)	UWE Relative Sättigungs- feuchte über Wasser bezogen auf Eis (%)
0	6.107	6.107	0.000	100.0	100.0
-5	4.213	4.015	0.198	95.3	109.4
-10	2.861	2.597	0.264	90.8	110.2
-15	1.911	1.652	0.259	86.5	115.7
-20	1.253	1.032	0.221	82.3	121.4
-30	0.509	0.380	0.129	74.7	133.8
-40	0.189	0.128	0.061	67.9	147.3

Approximationen:		P = Sättigungsdampfdruck über Wasser oder Eis			
P = 6.107 exp (a xT/ (b+T))	Wasser:	a = 17.856	b = 245.52		
T = b/((a/ln(P/6.107))-1)	Eis:	a = 22.365	b = 271.61		

Tab. 2.1 Wasserdampfdrucke über Wasser und über Eis, entsprechende relative Feuchten und für die Berechnung verwendete Approximation. Die Übereinstimmung der mit den Approximationen berechneten Wasserdampfdrucke mit den WMO-Tabellen ist mit ± 0.001 hPa gut.

2.2.2 Taupunkt und Frostpunkt

Der Taupunkt (Frostpunkt) bezeichnet diejenige Temperatur, bei der die Luft gegenüber Wasser (Eis) gesättigt ist. Kühlt man die Luft unter den Taupunkt (Frostpunkt) ab, findet auf Oberflächen Kondensation (Sublimation) statt. Man beachte, dass der Taupunkt einer Luftmasse immer tiefer ist als der Frostpunkt. Daher verdampfen die unterkühlten Wassertröpfchen in einer aus Wassertröpfchen und Eiskristallen bestehenden Wolke zugunsten der Eiskristalle, die dadurch verhältnismässig rasch wachsen können. Bei 0 °C Taupunkt beträgt der Wassergehalt der Luft etwa 5 g/m^3 . Er verdoppelt sich ungefähr bei 10 Grad Temperaturerhöhung.

2.2.3 Relative Feuchte

Die relative Feuchte gibt an, wieviel Wasserdampf in der Luft bei einer vorgegebenen Temperatur bezüglich dem Sättigungswert vorhanden ist. Da dieser, wie oben erwähnt, für Eis und Wasser verschieden ist, muss grundsätzlich angegeben werden, worauf sich die relative Feuchte bezieht. Falls nichts Spezielles erwähnt wird, bezieht sie sich auf Wasser (WMO-Definition). Bei einem Grad Temperaturerhöhung nimmt die relative Feuchte um ungefähr 7% ab, also z.B. von 100% auf 93% oder von 50% auf 46.5%.

2.2.4 Psychrometertemperatur

In jedem Moment stellt sich die Temperatur einer feuchten Oberfläche so ein, dass ein Gleichgewicht zwischen der zugeführten, fühlbaren Wärme und der durch Wasserdampf abgeführten Wärme besteht. Vorausgesetzt, dass keine anderen Wärme-flüsse, wie Strahlung, Wärmeleitung und Wärmespeicherung beteiligt sind, bezeichnet man diese Gleichgewichtstemperatur als Psychrometertemperatur. Diese liegt zwischen der Lufttemperatur und dem Taupunkt. Dies bedeutet, dass ein nasses Luftthermometer im allgemeinen zu tiefe Werte misst (Psychrometerfehler des Luftthermometers). Bei 14 °C Lufttemperatur ergibt 90% relative Feuchte eine Psychrometerdifferenz von einem Grad, bei -3 °C nur noch eine solche von einem halben Grad.

2.3 Prinzip des Taupunktspiegels

2.3.1 Mechanischer Aufbau

Der für die Feuchtemessung verwendete Taupunktspiegel ist mit einem Durchmesser von nur 2 mm möglichst klein gehalten. Dadurch konnte eine kurze Reaktionszeit auch bei niedrigen Temperaturen (geringer Wassergehalt der Luft) und bei kleiner Ventilationsgeschwindigkeit erreicht werden. Periodisch wird beim Messvorgang der Spiegel durch ein Peltierelement abgekühlt, bis der Taupunkt erreicht ist: In diesem Moment beschlägt sich der Spiegel mit Wassertröpfchen, bei tiefen Temperaturen mit Eiskristallen. Beides reduziert die Intensität des von einer Infrarotquelle ausgesandten und vom Spiegel reflektierten Lichtstrahls (vgl. Abb.2.1). Die Kühlleistung des Peltierelementes ist zur Intensität des reflektierten Lichtstrahls proportional.

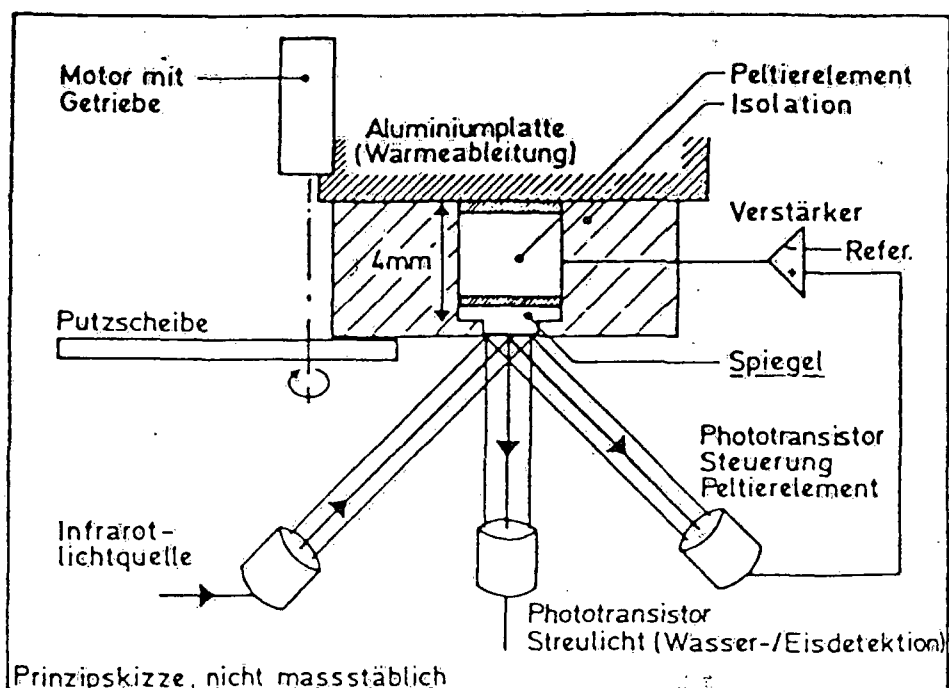


Abb. 2.1 Prinzipskizze Taupunktspiegel. Man beachte die Miniaturisierung des Peltierelementes mit einer Spiegeloberfläche von nur etwa 3 mm²

Der Taupunktfühler ist im THYGAN in einem separaten kleinen Gehäuse in der Wand des Ventilatorkanals untergebracht. In dieses wird aus der Hauptströmung des Ventilators ein kleiner Teil der Luftprobe abgezweigt. Die Luftgeschwindigkeit über dem Spiegel wurde für die Forderungen nach rascher Reaktion des Spiegels sowie kleiner Verschmutzung optimiert. Der Spiegel ist kreisförmig, von 2 mm Durchmesser, aus Kupfer, das mit mehreren galvanischen Überzügen gegen mechanische und chemische Beanspruchung geschützt ist. Dieser Spiegel ist direkt auf ein Peltierelement aufgeklebt und zusammen mit der Optoelektronik auf einen Aluminiumteil montiert. An diesem Aluminiumteil ist auch die Putzvorrichtung angebracht (vgl. Kap. 2.3.2). Die Optoelektronik besteht aus einer Infrarotlichtquelle, die in einem Winkel von 45 Grad den Spiegel beleuchtet. Gegenüber empfängt ein Lichtsensor das gespiegelte Licht im gleichen Winkel. Senkrecht über dem Spiegel ist ein weiterer Photosensor angeordnet, der das von der Spiegeloberfläche gestreute Licht empfängt, damit die Belagsart unterschieden werden kann (Wasser zur Bestimmung des Taupunktes, oder Eis zur Bestimmung des Frostpunktes), da die Berechnung der relativen Feuchtigkeit für diese zwei Fälle verschieden ist. Nach Abschluss des Messvorganges wird die Kühlung des Spiegels abgeschaltet, so dass er bis zum nächsten Messzyklus wieder vollständig trocken ist. Die Verunreinigung kann so verlangsamt werden. Überschreitet der mittels einer speziellen Reflexionsmessung bestimmte Verschmutzungsgrad der trockenen Spiegeloberfläche einen vorgegebenen Schwellwert, wird der Spiegel in feuchtem Zustand automatisch mit der Putzscheibe gereinigt.

Die Messbereiche betragen für die Lufttemperatur -50 bis $+50$ °C, für den Taupunkt -65 bis $+50$ °C. Trotz der verschiedenen Funktionen benötigt das Gerät für den Normalbetrieb (Kühlung/Heizung Taupunktspiegel, Spiegelreinigung und Ventilation; aber ohne Gehäuseheizung) im Mittel weniger als 0.2 W Leistung (bei niedriger relativer Feuchte maximal 2 W), so dass das Gerät während längerer Zeit aus der 12 V Stationsbatterie gespeist werden kann.

Um das Messprinzip des Taupunktspiegels für automatische Wetterstationen verwendbar zu machen, mussten einige Probleme gelöst werden:

1. Die Gehäusekonstruktion wurde für Dauerbetrieb ausgelegt (robust, wasserdicht, korrosionsfest usw.)
2. Der Spiegel wird automatisch, mechanisch gereinigt.
3. Eine ausgeklügelte Elektronik und kleine Spiegeldimension reduzieren den Stromverbrauch.
4. Der schnell reagierende Fühler kann zyklisch betrieben werden, da sein Reglerkreis genügend rasch stabil wird.
5. Mit einer geeigneten Gehäusekonstruktion und einer starken Heizung werden die notwendigen Öffnungen von Eis und Schnee frei gehalten.
6. Eine Auswertung des Streulichtes erlaubt die Unterscheidung von Wasser- und Eisdepots auf dem Spiegel. Die Wahrscheinlichkeit von Eisbildung ist ausserdem wegen der im zyklischen Betrieb kurzen Messzeit auch bei tiefen Temperaturen wesentlich kleiner als bei Dauerbetriebsmessungen.

2.3.2 Spiegelreinigung

Die Putzvorrichtung besteht aus einem kleinen Gleichstrommotor, der über ein Reduktionsgetriebe die Putzscheibe antreibt. Diese ist mit einem Reinigungsbelag versehen, der den Spiegel während einer vollständigen Umdrehung abwischt.

Bei trockener Spiegeloberfläche (mit geheiztem Spiegel) wird die Spannung der im reflektierten Licht messenden Fotodiode ausgewertet. Je nach Resultat wird das Licht neu eingeregelt oder der Spiegel wird geputzt, getrocknet und das Licht neu eingeregelt. Dieser Fall wird im Statuswort angezeigt. Der Putzvorgang wird eingeleitet, bevor die Spiegelverschmutzung einen merkbaren Einfluss auf das Messresultat haben kann.

2.3.3 Einlaufvorgang (Einstellzeit) beim Taupunktspiegel

Im Text zum wissenschaftlichen Kolloquium vom 9.6.82, S. 78 (Joss J. und Gutermann Th., 1982-84) erfolgte die Berechnung der Einstellzeit des Taupunktspiegels, welche für die Bildung eines Wasser- oder Eisbelages auf dem Spiegel durch Wasserdampfdiffusion notwendig ist. Dabei wussten wir damals aber noch nicht, wie dick die in jene Formel (4.12) einzusetzende, für eine Lichtabsorption von 25% notwendige Schicht sein muss. Heute können wir aus den Resultaten der Klimakammer von P. Wasserfallen (Abb. 2.2, Kurve A) diese Schichtdicke rückwärts bestimmen. Wir erhalten für einen Taupunkt von $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einem Wasserdampfdruck von 0.005 hPa (nicht 0.05 hPa , wie fälschlicherweise im Beispiel auf Seite 78 angeführt) und einer aus Abb. 2.3, Kurve A, auf $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ extrapolierten Einstellzeit von 210 s eine Schichtdicke von 10^{-7} m (100 nm). Dieses Resultat stimmt gut mit den in Joss (1983) beschriebenen, in Monti durchgeführten Messungen überein, wo eine Schichtdicke, unmittelbar nach dem Entstehen bei $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, von 75 nm bestimmt wurde. Allerdings wächst diese innerhalb von 20 Stunden Dauerbetrieb des Taupunktspiegels bei gleichbleibender optischer Schichtdicke (25% - Absorption) auf den 70-fachen Wert an.

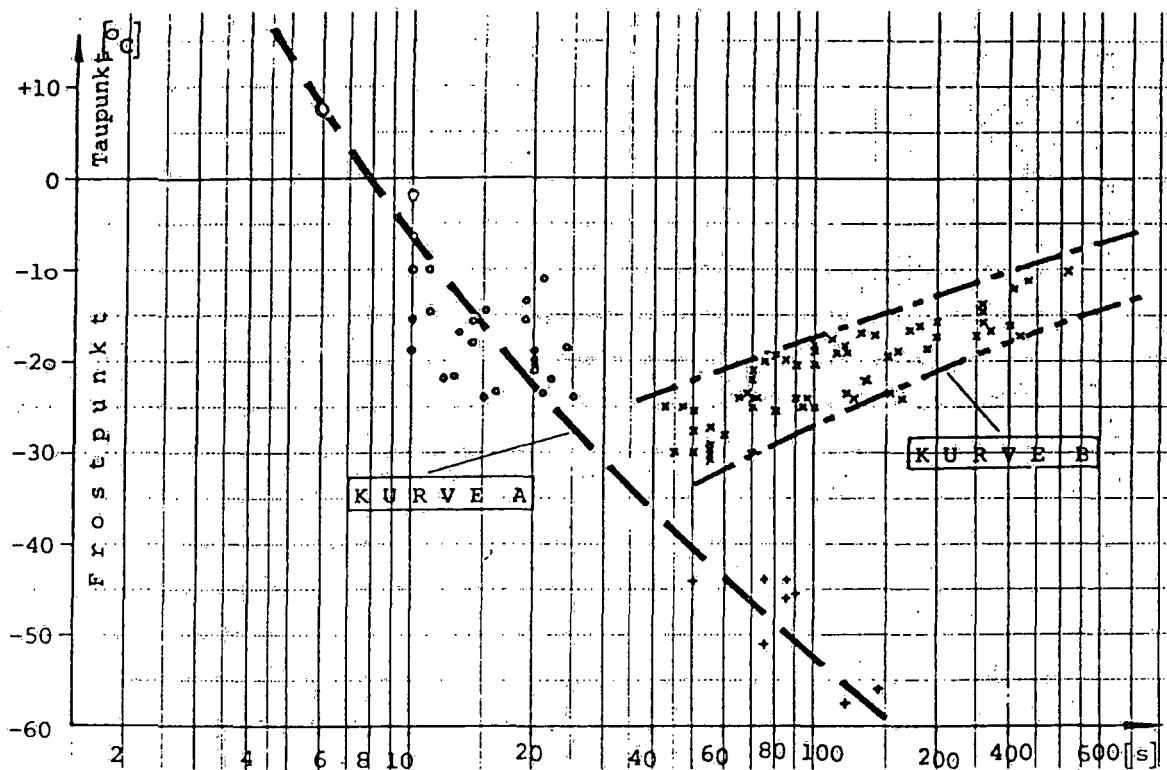


Abb. 2.2 Kurve A zeigt die Entstehungszeit des Taubelages (o) und des Reifbelages (+), Kurve B die Umwandlungszeit von Tau in Reif auf dem Spiegel, je in Funktion der Spiegeltemperatur. Man beachte, dass sich bis $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tau und erst bei tieferen Temperaturen Reif bilden kann. Für diese Reifbildung müssen die Zeiten aus Kurve A und B addiert werden. Im Gegensatz zur Entstehungszeit von Tau (Kurve A) dauert die Umwandlung in Reif (Kurve B) umso länger, je höher die Temperatur ist. Diese Umwandlung kann wesentlich mehr Zeit beanspruchen, als wenn sich der Reif direkt aus der Dampfphase bildet (+). Die Abbildung wurde von P. Wasserfallen aufgrund seiner Untersuchungen in der Klimakammer entworfen.

Die Untersuchungen in der Klimakammer in Payerne haben auf eindruckliche Weise die von verschiedenen Autoren festgestellten, teilweise widersprüchlichen Einlaufgeschwindigkeiten bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ erklärt. Die Vorgänge, die sich dabei abspielen, beschränken sich nicht auf die Diffusion und Kondensation von Wasserdampf, indem in diesem Temperaturbereich der Übergang von einer Tau- in eine Reifschicht erfolgen kann. Abhängig von der Temperatur des Spiegels und vom Verunreinigungszustand der Luft läuft dieser Prozess früher oder später ab. Dabei steigt die Temperatur des Spiegels, wie Fig. 4.2 auf Seite 80 des THYGAN-Kolloquiumtextes (J. Joss und Th. Gutermann, 1982-84) zeigt, vom Taupunkt auf den Frostpunkt an (z.B. von einer Taupunkttemperatur von $-22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf einen Frostpunkt von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Da dieser Phasenwechsel umso rascher abläuft, je tiefer die Spiegeltemperatur ist, tritt die grösste gemessene Verzögerung im Bereich von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf.

2.3.4 Wasser/Eis-Unterscheidung auf dem Spiegel

Unterhalb -10°C besteht die Möglichkeit, dass sich Eis innerhalb von 10 min auf dem Spiegel bildet (Abb.2.2). Da die Annahme einer Wasserschicht beim Vorhandensein einer Eisschicht auf dem Spiegel gemäss Kapitel 2.2 zu Fehlern bei der Bestimmung des Dampfdruckes führt, erfolgt die Unterscheidung Wasser/Eis auf dem Spiegel durch den Mikroprozessor aufgrund des zusätzlich gemessenen Streulichtes. Das Resultat wird auch bei der Berechnung der relativen Feuchte berücksichtigt. Die Unterscheidung beruht auf der Eigenschaft der Eiskristalle, Licht stärker zu streuen, als dies durch Wassertröpfchen geschieht. Erschwerend wirkt sich dabei allerdings aus, dass sich der Eisbelag bei konstanter optischer Schichtdicke durch Rekristallisation stark verändern kann.

Für diese Unterscheidung werden die beiden Spiegellichtsignale ausgewertet. Wegen der relativ grossen Exemplarstreuung der Spiegellichtsignale muss jeder Geber individuell geeicht werden. Dies geschieht automatisch im Programmablauf, wobei die Verhältnisse gespeichert werden, die sich im Fall von Wasser-Depot auf dem Spiegel bei Temperaturen über 0°C einstellen.

2.3.5 Mittelwertbildung THYGAN

Im Zehnminutenintervall misst das Gerät zwischen 9 min 15 sec und 9 min 50 sec mehrmals Lufttemperatur und Taupunkt und bestimmt daraus den Mittelwert und die Streuung. Beträgt die Streuung mehr als 2 Grad, wird dies im Statuswort signalisiert.

2.4 Spezielle Probleme Im Gebirge

2.4.1 Problemstellung

Sonnenstrahlung, Gehäuseheizung (zur Verhinderung von Vereisung) und Vereisungen wärmen das THYGAN-Gehäuse über die Temperatur der Umgebung auf. Abstrahlung in der Nacht und Verdampfen von Eis oder Wasser auf dem Gehäuse können es unter die Lufttemperatur abkühlen. Durch diese Ursachen wird die Temperatur der am THYGAN vorbeistreichenden und teilweise in das THYGAN gelangenden Luft verändert. Dies bewirkt einen Messfehler in Bezug auf Temperatur und Feuchte der ungestörten Luft. Wir möchten somit den Fühler so wenig wie möglich heizen und gleichzeitig stark ventilieren. Starke Ventilation jedoch erhöht die Gefahr von Vereisungen, welche insbesondere bei der Feuchtemessung, aber auch bei der Bestimmung der Lufttemperatur zu Messfehlern führen kann.

2.4.2 Massnahmen

Die nachfolgenden Massnahmen zur Reduktion dieses Fehlers wurden getroffen (J. Joss und Th. Gutermann, 1982-84):

1. Gut reflektierendes, weisses Gehäuse (geringe Temperaturerhöhung des Gehäuses durch Strahlung). Das Gehäuse soll ja, möglichst ohne die Messung zu behindern, die Sensoren und die Sensorenelektronik vor äusseren Einflüssen schützen: Vor Niederschlägen, Nebel, Wind, Sonneneinstrahlung, Vereisung, Hochfrequenzfeldern (z.B. von Rundfunksendern), Blitz- und NEMP-Einwirkungen (Nuclear ElectroMagnetic Pulse).
2. Günstige Formgebung des Gehäuses in Bezug auf Strahlungsschutz und zur Vermeidung der Rückführung von am Gehäuse erwärmter Abluft in die Messzone.
3. Günstige Formgebung des Thermometers (geringer direkter Strahlungsfehler und geringer Messfehler durch Wärmeleitung im Schaft des Thermometers).
4. Möglichst starke Ventilation (Kompromiss zwischen Lebensdauer des Ventilators, Leistungsaufnahme, Störung des Strömungs- und Temperaturfeldes). Der Ventilator ist eine wichtige und kritische Komponente. Er dient der Ventilation des Luftthermometers, damit Einflüsse der Strahlung und des Gehäuses auf die Temperaturmessung klein sind. Um seine Lebensdauer zu verlängern, wird der Ventilator nur eingeschaltet, wenn dies nötig ist. Er wird angetrieben von einem Gleichstrommotor mit hoher Lebensdauer und gutem Wirkungsgrad. Der Ventilator wird geheizt, wenn dies notwendig ist, um eine Blockierung durch Vereisung und eine vorzeitige Alterung durch Feuchtigkeitseinflüsse zu vermeiden. Am Ventilator sind deshalb zwei Heizungen angebracht. Die eine dient der Erwärmung des Ventilatorgehäuses, die andere der Erwärmung der geförderten Luft. Ueber diese Heizung wird auch die Betauung der Elektronik vermieden. Unter akuten Verei-

sungsbedingungen dreht der Ventilator dauernd, um ein Festfrieren des Rotors zu vermeiden. Die Form des Gehäuses wurde so konzipiert, dass der Wind die Wirkung des Ventilators nach Möglichkeit unterstützt.

5. Reduktion der Heizleistung auch während Vereisungssituationen auf das absolut Notwendige (geringer Fehler durch Heizung):

- Im Gehäuse verteilt sind mehrere Heizwiderstände angebracht, die das Gehäuse möglichst gleichmässig erwärmen. Diese Heizung soll einerseits eine Vereisung des Gehäuses vermeiden, soll aber andererseits nicht durch zu hohe Gehäusetemperatur die zu messende Luft zu sehr erwärmen. Deshalb sorgt das Steuer- und Reglersystem dafür, dass das Gehäuse nicht unnötig stark geheizt wird. Zu Beginn des 10 Minuten-Zyklus wird berechnet, wie stark das Gehäuse geheizt werden muss. Die Steuerung erfolgt durch Einschalten der Heizung im 10 Sekunden-Raster. Dies geschieht zu Beginn des 10 Minuten-Zyklus, wenn die Gehäusetemperatur kleiner als die Kontrolltemperatur TK wird, wobei TP für den vom THYGAN gemessenen Taupunkt steht:

$$TK = 0.9 \times TP + 4 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

Die Gehäuseheizung beträgt bei 48V-Netzspannung maximal ca. 130 Watt. Bei Ausfall der 48V-Netzspannung wird nicht geheizt.

- Die Ventilator-Heizleistung (maximal 30 W) wird abhängig gemacht von der Feuchtigkeit und davon, ob der Ventilator dreht oder nicht. Da ein Betauen des Gehäuses vermieden werden soll, wird die Differenz zwischen der Taupunkt- und der Gehäuse-Temperatur TG (d.h. ein grober Schätzwert der relativen Feuchte) als Steuerkriterium verwendet. Dabei wird die Einschaltdauer t_e innerhalb einer Periodendauer von 80 Sekunden in Schritten von 10 Sekunden verändert. Die Steuerung der Ventilatorheizung geschieht nach folgender Formel:

$t_e = 20 \times (4 - TG + TP)$ (2) t_e : Einschaltdauer der Ventilatorheizung in Sekunden innerhalb einer 80s-Periode bei drehendem Ventilator

$t_t = 10 \times (4 - TG + TP)$ (3) t_t : Einschaltdauer wie t_e , jedoch bei stehendem Ventilator

Während Vereisungssituationen dreht der Ventilator dauernd. Als Vereisungssituation gilt ein Zustand, in dem die Lufttemperatur kleiner als $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, die Luftfeuchtigkeit grösser als 95% und die Gehäuseheizung mindestens zu 20% in Betrieb ist. Bei drehendem Ventilator und 100% relativer Feuchte bezogen auf das Gehäuse ($TP = TG$) heizt die Ventilatorheizung somit dauernd mit ca. 30 W (bei stehendem Ventilator nur 40 von 80 s, im Mittel somit nur mit 15 Watt) und falls das Gehäuse mehr als 4 Grad wärmer als der Taupunkt ist (relative Feuchte bezogen auf die Gehäusetemperatur tiefer als ungefähr 70%), bleibt die Ventilatorheizung ausgeschaltet.

2.4.3 Korrekturmöglichkeiten

Nach all diesen Vorkehrungen bleibt immer noch ein Restfehler vorhanden. Dieser kann weiter reduziert werden, indem man die gemessene THYGAN-Temperatur TL proportional zur Differenz der Gehäuse-Temperatur TG zur Lufttemperatur TL korrigiert:

$$T = TL - k (TG - TL) \quad (4)$$

Der Faktor k bestimmt die Grösse der Korrektur. Dieser wurde anhand der Messungen mit den Prototypen auf dem Säntis und in Locarno in erster Näherung bestimmt. Er hängt von der Ventilationsgeschwindigkeit ab und beträgt bei 2 m/s ca. 20 %, bei 4 m/s 9%. Die Einführung dieser Korrektur reduziert nicht nur THYGAN-Messfehler sondern auch die Streuung der Temperaturdifferenzen THYGAN zu ventiliertem Thermometer wesentlich.

Beim THYGAN ergibt sich bei einer Strahlungsleistung von 600 W/m^2 eingestrahelter Leistung eine Temperaturerhöhung des Gehäuses von ca. 3 Grad. Bei einer exponierten Fläche von 0.09 m^2 kann man daraus den Absorptionskoeffizienten der weissen Farbe zu ca. 40% berechnen, was sinnvoll ist.

2.5 Neue Anwendungen

2.5.1 Erfassung von Strahlungsvorgängen

Eine grobe Auswertung der Differenz der Temperatur des THYGAN-Gehäuses zur Lufttemperatur hat eine gute Korrelation zur Abstrahlung vom Boden ergeben. Diese gute Übereinstimmung kommt wohl dank der durch den Ventilator gut definierten THYGAN-Ventilation zustande. Man kann deshalb vermuten, dass die THYGAN-Temperaturen eine bessere Abschätzung der Abstrahlung ergeben, als dies heute mit dem Grasthermometer, bzw. mit der Temperaturdifferenz Boden – 2 Meter möglich ist. Die Eigenschaften des Bodenthermometers sind ja durch unterschiedliche Aufstellung und Bodenbeschaffenheit schlecht definiert. Damit könnte sich die Möglichkeit eröffnen, mit dem THYGAN einen Beitrag zur Schätzung der Bewölkung, aber auch zur Frostprognose zu leisten.

2.5.2 Detektion von Nebel

An NFP14+ Stationen (vgl. Kap. 7) wurde die Nebeldetektion während einigen Jahren mit Erfolg genutzt. Zur Erläuterung der Vorgänge sei hier eine Fallstudie der Sektion Luftschadstoffe vom Paul Scherrer Institut vorgestellt (Abb.2.3). Sowohl am 10.10.90 (kurz vor Mitternacht bis am Mittag), wie auch am 11.10.90 (3 bis ca. 7 Uhr) wurde visuell Bodennebel beobachtet. Während diesen Zeiten hat das THYGAN einen Taupunkt gemessen, der oberhalb der Lufttemperatur lag. Die am Spiegel vorbeistreichende Luft war somit gegenüber der Lufttemperatur am Luftthermometer übersättigt. Dies kann dadurch erklärt werden, dass kleine Wolkentropfen in der am THYGAN-Gehäuse erwärmten Grenzschicht verdampfen, bevor sie zum Spiegel gelangen. Da ein Mikrontropfen (Durchmesser 10^{-6}m) bei 83% Feuchte und $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Lufttemperatur (Taupunkt $-2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, Psychrometer-temperatur $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) in 7 Millisekunden verdampft, ist dies ohne weiteres möglich. Größere Tropfen brauchen dafür mehr Zeit. Da die Verdampfungszeit mit dem Quadrat des Tropfendurchmessers zunimmt, hat ein 100-Mikrontropfen keine Chance mehr, vollständig zu verdampfen, umso mehr als er, dank seiner Trägheit, nicht in nützlicher Distanz abgebremst wird. Ein 10-Mikrontropfen dagegen kann der Luft bis zum Taupunktspiegel folgen, und wird in den ihm dafür zur Verfügung stehenden Sekunden noch gerade verdampfen. Daraus folgt, dass das THYGAN den Wassergehalt des Wolkentropfenanteils im Durchmesserbereich unterhalb von ca. 10 Mikron misst.

Relative Feuchten von über 100% (es wurden schon Werte bis 200% gemessen) bedeuten somit nicht unbedingt ein defektes THYGAN, sondern können durch Nebel am Fühlerstandort verursacht werden. In erster Näherung kann daraus eine Aussage über die Dichte des Nebels gemacht werden.

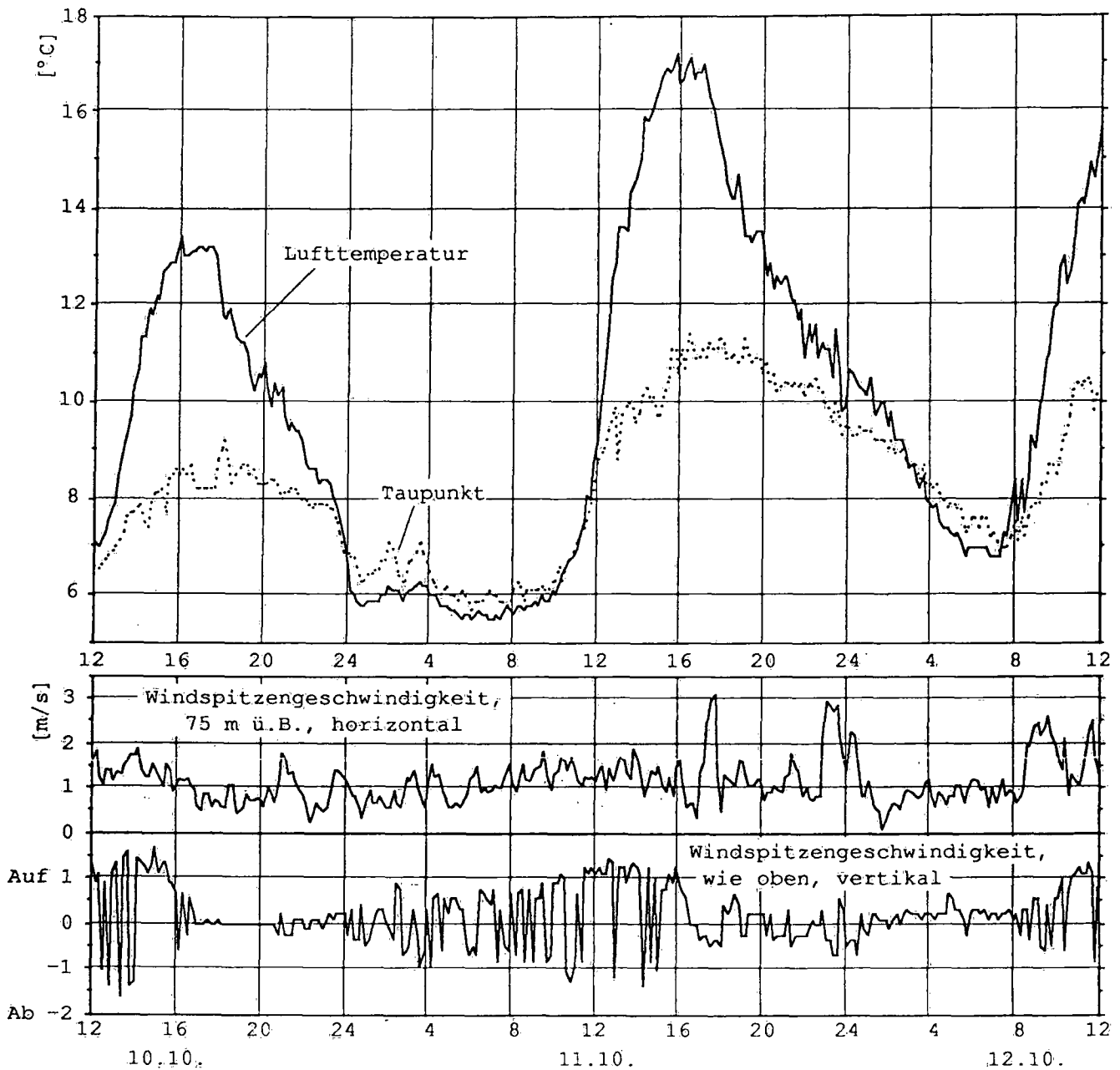


Abb. 2.3 10-Minuten-Mittelwerte der Lufttemperatur und des Taupunkts, gemessen mit einem THYGAN in der Tägerhard bei Wettingen (75 m über Grund, auf einem vom PSI, Sektion Luftschadstoffe, unterhaltenen Messturm des ehemaligen Nationalen Forschungsprogramms (NFP 14+)). In den frühen Morgenstunden liegt der Taupunkt bis zu einem knappen Grad über der Lufttemperatur (Übersättigung!). Dies ist durch Bodennebel zu erklären, dessen kleineren Tropfen im THYGAN verdunstet werden, bevor die Luft über den Taupunktspiegel streicht. 1 Grad Differenz zwischen Taupunkt und Lufttemperatur entspricht einer verdunsteten Wassermenge von ca. 0.5 g/m^3 . Man beachte, dass die horizontale Windspitzengeschwindigkeit mit Werten bis zu 2 m/s etwa doppelt so hoch ist, wie die vertikalen Windspitzen. Die Symmetrie um den Nullpunkt lässt auf dynamische Turbulenz, angeregt durch den horizontalen Wind schliessen.

3. Instrumentelle Modifikationen und ihr Einfluss auf das Datenmaterial der ersten Betriebsjahre (P. Ruppert Meteolabor AG, J. Joss)

Funktion und Technik des THYGAN sind von Ruppert (1991) im Detail beschrieben. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Modifikationen von den Prototypen bis zu den Seriegeräten kurz behandelt.

3.1 Prototypen

Im Winter 1982/1983 wurden die ersten drei Prototypen zunächst im Labor und dann im Feld untersucht. Die gewählten Standorte Payerne, Locarno und Säntis haben sehr unterschiedliche Klimata. So konnte das Verhalten der THYGAN-Prototypen unter verschiedenen Betriebsbedingungen unseres Landes geprüft werden. Die Beobachtungen führten zu einer Reihe von Modifikationen an der Konstruktion und am Computerprogramm:

a) Statuswort

Ausser den beiden vierstelligen Messwerten für Temperatur und relative Feuchtigkeit wurde eine sog. 'Kontrollkennziffer' (Statuswort) gleichen Formates eingeführt. Zweck dieses Statuswortes ist einerseits die Meldung des Betriebszustandes ausgewählter THYGAN-Komponenten sowie allfälliger Alarme, was für den operationellen Betrieb in einem Netz sehr nützlich ist. Andererseits können zusätzliche Messwerte wie z.B. die Gehäusetemperatur übertragen werden. Solche Messwerte sind für weitergehende Auswertungen der THYGAN-Messwerte nötig (z.B. Nebeldetektion oder Strahlungstemperatur des Gehäuses).

b) Thermometer

Betriebssicherheit und Funktion des Lufttemperatur-Fühlers und seiner Heizung wurden durch konstruktive Änderungen verbessert. Ein Psychometereffekt konnte in der Folge bis jetzt noch nie festgestellt werden.

c) Optoelektronik

Die an den Prototypen festgestellten Alterungserscheinungen der Spiegel-Optoelektronik wurden durch verschiedene Massnahmen wie z.B. künstliche Alterung so weit verbessert, dass die Lebenserwartung dieser Komponente heute mehr als fünfzehn Jahre beträgt.

3.2 Vorseriegeräte

Im Winter 1983/1984 konnten sieben Vorseriegeräte (drei modifizierte Prototypen und vier neue Geräte) an extremen Standorten wie z.B. Moléson und Chasseral erprobt werden (Modifikationsversion 2). Die Installationen an den Stationen 2,3,5,8,12,59 erfolgte Mitte Januar 1984. Adressen der ASTA-Meldungen: 35 TT; 36 UU; 37 Status. Die sieben Vorseriegeräte wurden ab Sommer 1987 gegen Geräte der Version 7 ausgewechselt.

Die Beobachtungen in dieser Messperiode erlaubten - u.a. auch dank der nun neu zur Verfügung stehenden Kontrollkennziffer - die Interpretation von besonderen Verhaltensweisen des Gerätes. Diese Kenntnisse führten zu Modifikationen an den Heizungen und am Spiegel-Putzverfahren. Die folgenden Modifikationen sind in der Version 4 enthalten:

a) Ventilator-Heizung

Sie soll das Vereisen des Ventilators vermeiden und hilft ausserdem eine Betauung im Innern des Sensors zu verhindern. Das Computerprogramm steuert die Heizung, abhängig von der Differenz Gehäusetemperatur minus Taupunkt der Luft.

b) Gehäuse-Heizung

Die Regelung dieser Heizung wird beeinflusst von den Temperaturen der Luft, des Gehäuses und des Taupunktes. Eine unnötig starke Heizung des Gehäuses ist unerwünscht, und extreme Regelausschläge infolge von turbulenten Vorgängen müssen geglättet werden. Nach der Einführung dieser Modifikationen verhält sich die Gehäusetemperatur deutlich ruhiger, was einen günstigen Einfluss auf die Messung der Lufttemperatur hat.

3.3 Serlegeräte

a) 1. Serie

Im Sommer 1985 installierte die SMA die 1. Serie von 22 auf den neuesten Stand (Version 4) modifizierten Geräten im ANETZ.

Ab August 1985 wurden an den Stationen 1,4,10,11,13,15,18,20,24,27,28,32,33, 35,36,44-47,62 die Serlegeräte installiert. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die offizielle Feuchtigkeitsmessung mit dem THYGAN, weshalb die ASTA-Kennziffern wie folgt umgestellt wurden: 05 UU, 25 TT, 20 Status (Haarhygrometer: 31 UU, 30 TT).

b) 2. Serie

In den Jahren 1987 und 1988 sind die restlichen ANETZ-Stationen mit THYGANs der neuesten Version 7 ausgerüstet worden. Ausserdem wurden im Jahre 1987 die sieben Geräte der Vorserie und die 22 Geräte der 1. Serie auf den neuesten Stand gebracht, so dass ab Juni 1988 alle ANETZ-Stationen (ausser KKW) mit THYGANs der gleichen neuesten Modifikationsstufe (Version 7) arbeiten. Die folgenden Modifikationen sind in der Version 7 enthalten:

Aufgrund von weiteren Untersuchungen wurde im Laufe des Jahres 1987 die Elektronik nochmals geringfügig modifiziert, die Heizleistungen des Ventilators auf 30 Watt sowie jene des Spiegelgehäuses auf 5 Watt erhöht. An der Ventilator-Heizungsanordnung werden diverse Details modifiziert, die das vereisungsbedingte Blockieren des Ventilators vermeiden sollen.

Der höchste übertragbare relative Feuchtigkeitswert wird von 199% auf 399% erhöht. Oberhalb 399% wird "Wert ungültig" gemeldet. Solche hohen Feuchtigkeitswerte misst THYGAN immer dann, wenn die Luft viel flüssiges Wasser oder Eis enthält (z.B. bei Nebel).

Die Aenderungsgeschwindigkeit der Gehäuseheizleistung wird begrenzt, indem ihre Leistung zu Beginn jeder Zehnminuten-Periode festgelegt wird (vorher alle zehn Sekunden). Ausserdem ist die Aenderung der Leistung zwischen zwei folgenden Zehnminuten-Zyklen limitiert, um zu grosse Gehäusetemperaturvariationen zu vermeiden. Es wird immer zu Beginn des Zehnminutenzyklus geheizt, so dass der Gehäusetemperatureinfluss auf die Temperaturmessung klein ist.

Es hatte sich gezeigt, dass die benötigte Zeit für die Depotbildung auf dem Spiegel bei tiefen Taupunkt- bzw. Reifpunkt-Temperaturen u.a. auch von der Spiegelverschmutzung abhängig ist. Deshalb wird der Spiegel bei tieferen Taupunkten häufiger geputzt. Der Putzmechanismus konnte ausserdem in seiner Funktion verbessert werden. Diese Modifikation hat die Taupunkttemperatur-Messleistung des THYGAN verbessert.

Die längere Einlaufzeit der Spiegelregelung wird bereits unterhalb von Taupunkten von -25°C (vorher -30°C) eingeschaltet, um etwas mehr Sicherheit für die Bildung des Depots auf dem Spiegel zu erreichen.

In der Statusanzeige wird zusätzlich gemeldet, ob die 48V-Heizspannung vorhanden ist.

Die Eis/Wasser-Detektion wird verbessert, indem sich jeder Sensor automatisch und individuell mittels gleitendem Mittelwert des charakteristischen Koeffizienten eicht.

4. Verarbeitung der Daten (G. Haller, R. Dössegger)

4.1 Auftellung der Verarbeitungsschritte

Die vom THYGAN gemessenen Grössen müssen einerseits für lokale Anwendungen vor Ort angezeigt werden, andererseits werden sie in die Netzzentrale übertragen. Die in die Netzzentrale übertragenen Werte werden aus historischen Gründen als "Originalwerte" bezeichnet, obwohl der Mikroprozessor des Instrumentes vor Ort bereits erste Berechnungen durchführt. Die Netzzentrale "AZEN" leitet aus den empfangenen Daten weitere Grössen ab und übermittelt diese dem Datenbankrechner METEOR.

4.2 Verarbeitung im Messinstrument

4.2.1 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Das THYGAN misst die Temperatur mittels eines Kupfer-Konstantan-Thermoelements und den Taupunkt mittels Taupunktspiegel. Da vor Ort die relative Feuchtigkeit und nicht der Taupunkt benötigt wird, berechnet das Instrument diese mittels folgender Formel:

$$A05 = 1000 \times e^{\left(\frac{a \times T_p}{b + T_p} - \frac{a \times T_l}{b + T_l} \right)} \quad [‰]$$

wobei:

T_p: Taupunktstemperatur
 T_l: Lufttemperatur
 a, b: Koeffizientensatz

Bei dieser Formel handelt es sich um eine Näherungsformel, die die relative Feuchtigkeit aus dem Verhältnis der Sättigungsdampfdrücke berechnet. Die Einheit des Resultates sind Promille. Die Koeffizienten a und b nehmen drei verschiedene Wertepaare an: Eines für Wasser auf dem Spiegel und Temperaturen über oder gleich 0°, eines für Wasser auf dem Spiegel und Temperaturen unter 0°, sowie eines für Eis auf dem Spiegel. Die Werte sind:

	a	b
für T ≥ 0° C und Wasser:	17.368	238.83
für T < 0° C und Wasser:	17.856	245.52
für T < 0° C und Eis:	22.365	271.61

Das THYGAN misst sowohl den Taupunkt wie die Temperatur innert eines 10-Minuten-Intervalls nicht nur einmal, sondern in der letzten Minute etwa zehnmal. Die einzelnen Messwerte jeder Grösse werden gemittelt und die zugehörige Streuung berechnet.

4.2.2 Statuswort

Das THYGAN generiert zusätzlich zu Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerten noch ein Statuswort, das in verschlüsselter Form Auskunft über den Zustand des Gerätes gibt. Jeder Stelle eines vierstelligen Parameters sind bestimmte Bedeutungen zugeteilt. Die Auswertung des Inhalts dieses Parameters erlaubt es, Störungen rasch zu erkennen und zum Teil Instrumentenfehler festzustellen, bevor sie gravierende Auswirkungen haben.

Im Parameter A20 werden folgende Informationen übertragen:

- | | | |
|-----------|--|---|
| 1. Stelle | 0: | Messwert in Ordnung |
| | 1: | Streuung der Lufttemperatur > 2° C |
| | 2: | Streuung der Taupunkttemperatur > 2° C |
| | 4: | Heizspannung ausgefallen |
| | 8: | Datenübertragung Geber-Interface unterbrochen |
| | 9: | Steuerungsprogramm neu gestartet (Initialisierung) |
| 2. Stelle | 0: | Wasser auf dem Taupunktspiegel |
| | 1: | Eis auf dem Taupunktspiegel |
| | 2: | Alterung der Lichtquelle |
| | 4: | Spiegel wurde gereinigt |
| | 8: | Ventilator nicht in Ordnung |
| 3. Stelle | Temperaturunterschied ΔT des Gebergehäuses zur Luft, wobei | |
| | 0: | $\Delta T \leq -1.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 1: | $-1.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq -0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 2: | $-0.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 3: | $0.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 1.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 4: | $1.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 5: | $2.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 3.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 6: | $3.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 7: | $4.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 5.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 8: | $5.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T \leq 6.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | 9: | $6.5 \text{ } ^\circ\text{C} < \Delta T$ |
| 4. Stelle | Information über die Anzahl der Heizzyklen. Die Heizung ist während einer vor-ausberechneten Anzahl von 10-Sekundenzyklen aktiv. | |

4.2.3 Datenübermittlung

Alle zehn Minuten werden die Daten via Mietleitungsnetz von der Station zur Netzzentrale übertragen. Die von der Station gelieferten Werte werden als "Originalwerte" bezeichnet, wobei die verschiedenen Grössen durch Zahlen gekennzeichnet sind. Zur Unterscheidung von durch die Netzzentrale berechneten Werten tragen Originalwerte die Kennzeichnung "A". Das THYGAN liefert folgende Grössen:

- A03 Lufttemperatur (seit 1.1.91 unter dieser Kennziffer)
- A05 rel. Luftfeuchtigkeit
- A20 Statuswort
- A25 Lufttemperatur (von Betriebsaufnahme bis 1.1.91)

4.3 Verarbeitung in der Netzzentrale

Die von der Station gelieferten Originalwerte werden von der Netzzentrale einerseits in die Originalwertdatei abgelegt, andererseits werden daraus weitere Grössen abgeleitet. Jeder Originalwert wird mit einem einfachen Plausibilitätscheck geprüft, einzelne werden noch mittels eines Eichpolynoms korrigiert. Die Verarbeitung der THYGAN-Messwerte liefert folgende Grössen:

meteorologische Grösse	berechneter Parameter	Eingangsgrossen bis 1.1.91	Eingangsgrossen ab 1.1.91
Lufttemperatur	B03	A03 (VHT)	A03 (THYGAN)
relative Luftfeuchtigkeit	B05	A05, B03, B25	A05
Dampfdruck	B116	B03, B05	B03, B05
Taupunkt	B117	B116, B05	B116, B05
Psychrometertemperatur	B118	B03, B117, Stationshöhe	B03, B117, Stationshöhe

Fehlt eine der Eingangsgrossen infolge Instrumentenausfall, so sind alle abgeleiteten Grössen nicht definiert.

4.3.1 Berechnung der relativen Feuchtigkeit

Gemäss Empfehlungen der World Meteorological Organisation (WMO) sollen veröffentlichte Werte für Luftfeuchtigkeiten auf den Eigenschaften des Haarhygrometers basieren. Durch das angewandte Messprinzip kann THYGAN auch Werte messen, die über 100% liegen, beim Haarhygrometer sind solche Werte nicht möglich.

Bei Temperaturen unter null Grad erreicht das Haarhygrometer 100% nicht mehr, da durch die umliegenden Flächen der Dampfdruck der Luft auf Sättigungswerte über Eis begrenzt wird, die tiefer sind als diejenigen über Wasser.

Im Normalfall entspricht die in der Netzzentrale berechnete relative Feuchtigkeit dem vom THYGAN gelieferten Wert. Liefert THYGAN Werte, die über 100% liegen, so werden sie bei Temperaturen über 0° C auf 100% begrenzt, bei tieferen Temperaturen gemäss folgender Formel beschränkt:

$$B05 (\text{max}) = 1000 \times 0.999742 \times e^{(0.00971 \times T1)}$$

In den Achtzigerjahren wurde die offizielle Temperatur noch durch das ventilierte, geheizte Thermometer (VHT) geliefert. Da zwischen dieser Temperatur und der THYGAN-Temperatur meistens gewisse Unterschiede auftraten, wurde die relative Feuchtigkeit auf die Mitteltemperatur von VHT und THYGAN reduziert. Seit dem 1. Januar 1991 liefert THYGAN auch die offizielle Temperatur, womit diese Korrektur entfällt.

4.3.2 Berechnung des Dampfdrucks

Der Dampfdruck bei aktueller Lufttemperatur berechnet sich aus folgender Formel, die die empirisch erhobene Dampfdruckkurve beinahe ideal annähert:

$$B116 = \frac{B05}{1000} \times c \times e^{\left(\frac{a \times B03}{b + B03}\right)}$$

wobei

a, b, c Koeffizientensatz

Die Koeffizienten nehmen folgende Werte an:

	a	b	c
für B03 ≥ 0° C:	17.368	2388.3	0.06107
für B03 < 0° C:	17.856	2455.2	0.06108

4.3.3 Berechnung der Taupunkttemperatur

THYGAN misst zwar die Taupunkttemperatur direkt, muss diese jedoch für lokale Anwendungen in die relative Luftfeuchtigkeit umrechnen. Da die im ANETZ zur Verfügung stehenden Kennziffern für zu übertragende Grössen beschränkt sind, kann die Station nicht Taupunkttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit liefern. In einem weiteren Schritt berechnet daher die Netzzentrale unter Verwendung der obigen Koeffizienten die vom THYGAN ursprünglich gemessene Taupunkttemperatur:

$$B117 = \frac{b \times \ln\left(\frac{B05 \times (B116)}{c}\right)}{a - \ln\left(\frac{B05 \times B116}{c}\right)}$$

4.3.4 Berechnung der Psychrometertemperatur

Die Psychrometertemperatur wird mit folgender Näherungsformel berechnet:

$$B118 = B117 + \frac{B03 - B117}{1 + \frac{1}{PSC} \times e^{\left(\frac{11.564 \times T}{1742 + T}\right)}}$$

wobei

$$T = B117 + \frac{(B03 - B117) \times (420 - B117)}{1400}$$

und

$$PSC = 1.5898 \times e^{\left(\frac{h}{\frac{h}{12.5} - 8351}\right)}$$

wobei h = Stationshöhe in m.

4.3.5 Auswirkungen des Statuswortes auf die Daten

Die Netzzentrale überprüft den Inhalt des Statuswortes und erklärt falls notwendig einzelne oder alle gemessenen Werte für ungültig.

Wird eine Ueberschreitung der Streuung der Lufttemperatur angezeigt, so werden seit dem 5. Juli 91 alle berechneten und abgeleiteten Grössen ungültig gesetzt. Vor diesem Termin wurden nur die Feuchtigkeit und die daraus abgeleiteten Grössen ungültig gesetzt.

Bei Ueberschreitung der Streuung des Taupunkts wird die Feuchtigkeit und die daraus abgeleiteten Grössen Dampfdruck, Taupunkt und Psychrometertemperatur ungültig gesetzt, sofern die Abweichung des aktuellen Wertes vom schleppenden Mittel grösser als 30% ist.

Ein Ausfall der Heizspannung wird auf der Ueberwachungskontrolle zwar angezeigt, hat jedoch keine unmittelbare Auswirkung auf die Daten.

Bei Unterbruch der Datenübertragung und bei Initialisierung des Instrumentes sind natürlich alle Werte ungültig gesetzt.

Die Eis/Wasserdetektion in der zweiten Stelle des Statuswortes hat nur informativen Charakter und keinen Einfluss auf die Datenbearbeitung in der Netzzentrale.

Die Alterung der Lichtquelle wird auf der Ueberwachungskontrolle angezeigt, die Daten bleiben jedoch gültig, da diese Information so frühzeitig erfolgt, dass ein Austausch des Instrumentes vor einer Verfälschung der Messwerte erfolgen kann.

Bei einer Spiegelreinigung werden die Feuchtigkeit und die daraus abgeleiteten Grössen ungültig gesetzt.

Ist der Ventilator nicht in Ordnung, so sind alle gemessenen und abgeleiteten Grössen ungültig gesetzt.

Jede Veränderung der ersten beiden Stellen des Statuswortes wird auf der Ueberwachungskontrolle des Netzes in geeigneter Art angezeigt. Der zuständige Netzbetreuer kann damit unverzüglich geeignete Massnahmen zur Fehlerkorrektur ergreifen.

4.4 Verarbeitung im Datenbankrechner METEOR

Der Datenbankrechner METEOR empfängt die Daten als Originalwerte, berechnete Parameter und Stundenwerte von der Netzzentrale. Die Stundenwerte werden am Folgetag per Programm kontrolliert:

- Kurze Lücken in der Stundendatei werden automatisch linear interpoliert. Grössere Lücken werden für die manuelle Bearbeitung protokolliert.
- Die Stundenwerte werden mit Augenbeobachtungswerten und Niederschlagsdaten verglichen und so auf ihre Plausibilität geprüft. Unplausible Werte werden für die manuelle Bearbeitung protokolliert.

Basierend auf dem Protokoll werden Lücken manuell gefüllt, unplausible Werte beurteilt und allenfalls korrigiert. Aus den Stundendaten werden Tages- und Monatswerte berechnet.

5. Comparaison du THYGAN avec d'autres instruments

5.1 Expériences d'exploitation (G. Haller, G. Pilet)

5.1.1 Statistique de l'adresse de contrôle

Une première estimation de l'état de fonctionnement du THYGAN est possible à l'aide d'une analyse de l'adresse de contrôle. Sur la base des données 10 minutes de l'ensemble des stations ANETZ, les différents états, décrits au chapitre 4, ont été comptabilisés pour la période du 1.1.90 au 31.12.90. Il en découle le tableau suivant:

Total des mesure	3406861	100.00%
Ecart type de la température de l'air > 2° C	1863	0.055%
Ecart type de la température du point de rosée > 2° C	6201	0.18%
Panne de chauffage	0862	0.32%
Perturbation de la transmission capteur-interface	4127	0.12%
Initialisation	469	0.01%
Vieillessement de la source lumineuse	1004	0.03%
Nettoyage du miroir	7198	0.21%
Ventilateur en panne	6418	0.19%

Si l'on ne prend en considération que les cas ayant causé une perte de données, il subsiste un taux global d'environ 0.6%. Ce résultat, comparé à celui obtenu avec l'hygromètre à cheveux, peut être qualifié de très bon. Néanmoins, les taux de pertes sont fort différents d'une station à l'autre. Le tableau suivant indique les valeurs mesurées aux différentes stations. Les taux de perte étonnamment élevées à certaines stations de montagne ne sont, en règle générale, pas dus à des pannes fréquentes, mais à une cause unique qui n'a pu être réparée assez rapidement à cause du mauvais temps.

5.1.2 Statistique des pannes

année	années d'exploitation	pannes	φTHYGAN	φVHT
1985	9.5	8	0.84	0.60
1986	24.3	16	0.66	0.60
1987	25.6	10	0.39	0.60
1988	53.6	15	0.28	0.84
1989	63.0	19	0.30	0.27
1990	65.0	13	0.20	0.37

Les valeurs moyennes indiquées correspondent au nombre de pannes par instrument et par année d'exploitation. Les interruptions pendant les révisions d'instruments effectuées lors des travaux d'entretien annuels ne sont pas comptées comme pannes. Le faible taux de perte du thermomètre ventilé VHT en 1989 provient du fait que cet instrument a été systématiquement échangé lors des travaux d'entretien.

Le service de la section Instruments à Payerne a répertorié les principales raisons de pannes suivantes qui, entre temps, ont pu être éliminées en grande partie grâce à des modifications apportées à l'instrument.

- Constatation générale en cas de mauvais temps, de tempêtes, de périodes de givres etc.: la cheminée de mesure se remplit de givre ou de glace suivant la nature des précipitations. Le ventilateur malgré son chauffage enclenché à pleine puissance se bloque, favorisant ainsi l'obstruction de la cheminée.
- Le programme de chauffage a été amélioré, la puissance de chauffage du ventilateur augmentée, la distance de l'hélice par rapport aux résistances de chauffage a été augmentée.
- Le fil de chauffage en constantan qui entoure le corps du ventilateur a été à plusieurs reprises corrodé. Une meilleure protection a été apportée.

- Nous avons constaté plusieurs fois un blocage du ventilateur dû à la présence de petits insectes écrasés et collés à l'intérieur de la cage du ventilateur. Une diminution du diamètre de l'hélice a été nécessaire pour augmenter le jeu de l'hélice.
- La signalisation "dispersion de la température" a été produite par une perturbation du collecteur de quelques ventilateurs. Le déparasitage sur le connecteur du ventilateur par une capacité de 33 nF a fait disparaître ce défaut.
- Le connecteur Lemo "normal" a été remplacé par un connecteur "étanche".
- On a dû corriger une erreur du "layout" de l'interface du THYGAN. Trois circuits intégrés n'étaient pas alimentés en tension.
- On a changé à plusieurs reprises l'EPROM (mémoire pour le programme) de l'interface. A ce jour nous en sommes à la version No. 7.
- A plusieurs occasions nous avons remarqué la présence de pannes qui disparaissent lors de tests fait en laboratoire ou sur le terrain d'essais. Par exemple le nettoyage du miroir qui se fait d'une manière répétitive sans aucun motif.

sta- tion	initiali- sation	sans réponse	aliment. absente	dispers. pt. rosée	dispers. temp.	ventil. défect.	nettoy. miroir	lum. faible	nb. tot. indéf.	nb. tot. correct	% indéf.
1	1	0	2	152	16	2	148	0	167	52493	0.32
2	17	0	0	78	79	0	83	0	179	52434	0.34
3	190	1499	4322	342	55	3967	211	1	5922	52505	11.28
4	11	0	16	32	16	0	87	0	114	52505	0.22
5	6	8	7	261	22	11	144	0	191	52524	0.36
6	12	0	0	77	39	0	92	0	143	52352	0.27
7	6	119	6	50	38	0	83	0	246	52508	0.47
8	14	893	366	113	33	325	113	0	1378	51768	2.66
9	4	0	31	17	19	0	80	0	103	52483	0.20
10	3	1	5	24	21	249	106	0	380	52433	0.72
11	2	0	1426	77	31	0	131	0	164	52307	0.31
12	4	0	89	43	8	38	106	0	156	52502	0.30
13	6	0	7	297	21	6	121	0	154	52517	0.29
14	5	0	0	36	19	0	84	0	108	52438	0.21
15	2	0	56	117	39	0	112	0	153	52464	0.29
16	3	0	12	171	28	0	102	0	133	52518	0.25
17	3	0	2	49	13	0	84	0	100	52509	0.19
18	1	0	12	232	39	0	125	0	165	52502	0.31
19	0	0	1	36	17	1	89	0	107	52487	0.20
20	2	0	285	95	5	9	98	0	114	52276	0.22
21	3	0	59	121	72	6	112	0	193	52461	0.37
22	1	0	10	104	17	2	138	49	158	52512	0.30
23	7	6	15	13	11	4	89	0	117	52475	0.22
24	8	0	12	127	44	7	168	512	227	52518	0.43
25	4	324	1	29	13	0	82	0	423	51950	0.81
26	10	0	59	247	31	0	107	0	148	52450	0.28
27	2	0	48	116	41	26	149	0	218	52507	0.42
28	2	0	5	183	45	0	111	0	158	52340	0.30
29	0	0	4	45	27	0	84	0	111	52335	0.21
30	4	1	394	34	25	404	89	0	523	52473	1.00
31	4	0	1	38	21	0	87	0	112	52498	0.21
32	3	0	2	98	26	0	116	5	145	52518	0.28
33	2	0	181	152	15	7	132	0	156	52420	0.30
34	2	0	1	24	27	0	75	0	104	52503	0.20
35	7	989	34	60	19	6	159	0	1180	52513	2.25
36	4	0	119	203	29	0	300	254	333	52481	0.63
37	2	0	251	111	28	219	126	117	375	52483	0.71
38	8	0	5	82	24	0	96	0	128	52412	0.24
39	2	0	21	47	20	0	99	0	121	52521	0.23
40	6	0	14	97	21	272	100	0	399	52526	0.76
41	5	0	1	28	22	0	86	0	113	52526	0.22
42	4	0	1	67	36	0	90	0	130	52529	0.25
43	4	0	7	48	21	46	83	0	154	52495	0.29
44	4	0	0	61	32	0	85	0	121	52525	0.23
45	5	278	114	27	18	279	112	0	692	52503	1.32
46	3	0	176	105	9	179	138	1	329	52127	0.63
47	10	1	1524	133	34	345	213	65	603	52504	1.15
48	1	0	26	78	55	1	94	0	151	52519	0.29
49	8	0	11	106	16	0	111	0	135	52507	0.26
50	1	0	7	231	19	0	128	0	148	52344	0.28
51	3	0	18	8	9	0	78	0	90	51928	0.17
52	0	0	22	83	39	0	109	0	148	50785	0.29
53	4	0	0	43	14	0	88	0	106	52511	0.20
54	2	0	13	36	23	0	79	0	104	52505	0.20
56	3	0	22	54	26	2	84	0	115	52531	0.22
57	2	0	4	48	13	0	104	0	119	52439	0.23
58	11	0	0	111	29	0	82	0	122	52528	0.23
59	3	0	0	23	9	0	85	0	97	52517	0.18
62	0	0	149	104	29	1	107	0	137	52517	0.26
63	3	1	31	165	16	1	122	0	143	52490	0.27
65	1	0	349	198	166	0	101	0	268	52482	0.51
66	5	7	14	41	17	3	121	0	153	52209	0.29
67	3	0	486	44	19	0	97	0	119	52515	0.23
68	5	0	0	37	26	0	86	0	117	52520	0.22
70	6	0	6	92	52	0	97	0	155	52384	0.30
Total	469	4127	10862	6201	1863	6418	7198	1004	20075	3406861	0.59

Tab. 5.1 Taux d'erreurs des données THYGAN de chaque station ANETZ 1990 basé sur les données de 10 minutes.

5.2 Temperatur

Das vorliegende Unterkapitel besteht aus zwei Teilen. Der erste (5.2.1) beschreibt einige Feldtest-ergebnisse während der Entwicklung des THYGAN vom Prototyp bis zum Seriengerät. In diesen Feldtests wurde das THYGAN vor allem auf dem Versuchsgelände der Sektion ENV in Payerne mit verschiedenen anderen Thermometern verglichen.

Im zweiten Teil (5.2.2) werden Resultate von Vergleichen behandelt, die zwischen THYGAN und anderen Thermometern im routinemässigen ANETZ-Einsatz festzustellen sind.

5.2.1 Comparaison sur le terrain d'essais SAP/ENV (P. Wasserfallen)

Les tests en enceinte climatique (P. Wasserfallen, 1983), puis les comparaisons sur le terrain d'essais de Payerne ont permis de déterminer les performances effectives de mesure du THYGAN. Ces importantes investigations représentent la contribution principale de la section ENV au développement et à la mise au point de ce thermo-hygromètre. Les tests et comparaisons de THYGAN sur le terrain se rapportent à deux campagnes de mesures:

La première, s'étendant de 1978 à 1986, confrontait différents types de thermomètres et d'hygromètres dont un THYGAN-prototype dès septembre 1983, puis un THYGAN-présérie de janvier 1984 à mars 1985. Le système d'acquisition des données était du type ASTA, utilisé dans le réseau ANETZ, mais avec le programme "mesures horaires" (valeurs momentanées). Les résultats de ces différentes étapes sont décrits en détail dans les rapports y relatifs (P. Wasserfallen, 1983 - 85).

La deuxième campagne de mesures (projet COMparaison de RADiomètres COMRAD) a débuté en novembre 1987 et se poursuivra dans le cadre d'un nouveau projet (Baseline Surface Radiation Network BSRN) dès 1992. Son programme est principalement axé sur les mesures de rayonnement mais 3 thermomètres y sont toujours confrontés soit: un THYGAN-série; un thermomètre ventilé VT3 (notre référence avant THYGAN) et le thermomètre dans l'abri de l'hygromètre à cheveux ("abri-hygro"). L'acquisition des données s'effectue par un système KLIMET de Meteolabor AG avec un intervalle de mesure de 10 min. Précisons aussi que les thermomètres VT3, VHT et abri-hygro en question sont équipés d'une sonde (thermistance) YSI série 700, VT3 et VHT sont ventilés; en plus VHT est chauffé après chaque mesure.

Thermomètre VT3/THYGAN-série: Comme première comparaison, la figure 5.1 représente deux droites de régression des moyennes horaires de nos deux meilleurs thermomètres pour une période de mesure de 3 ans (mai 1988-avril 1991). La moitié gauche (a) illustre la régression linéaire des températures entre THYGAN et VT3; la moitié droite (b) fait ressortir les différences entre les deux thermomètres (VT3 - THYGAN) en fonction de la température de l'air (THYGAN).

Commentaires: En général très bonne concordance: coefficient de corrélation ($r = 1,00$); $D = 0,02^\circ\text{C}$; pente = 0,98; offset à l'origine = $0,15^\circ\text{C}$. La dispersion des points ($s = 0,22^\circ\text{C}$) provient essentiellement de la différence d'échantillonnage des deux instruments (VT3 = valeur momentanée; THYGAN = moyenne sur 30 sec.) ainsi que de la non-linéarité ($\pm 0,15^\circ\text{C}$ de la sonde YSI du VT3). Les deux principales faiblesses du thermomètre VT3 (ventilé mais pas chauffé) apparaissent clairement dans le groupe de points A: effet psychrométrique sur la sonde que peut mouiller indirectement la pluie par forte turbulence; et dans le groupe B: obstruction occasionnelle de l'embouchure du thermomètre par de la neige ou du givre ce qui entrave alors la ventilation.

THYGAN/thermomètre VHT (ANETZ): Deux comparaisons ont été élaborées pour ce couple d'instruments; la première se rapporte à la première campagne de mesure où un THYGAN-présérie est comparé au thermomètre VHT (ventilé et chauffé) comme utilisé aux stations du réseau ANETZ. La période considérée s'étend du 01.06.84 au 07.03.85 soit plus de 9 mois dont un hiver. La régression linéaire donne les résultats suivants: $r = 1,00$; $D = 0,02^\circ\text{C}$; pente = 1,01; offset = $-0,01$.

Commentaires: Très bonne concordance. Comme pour la comparaison précédente (VT3/THYGAN), l'écart type $s = 0,29^\circ\text{C}$ provient essentiellement de la différence d'échantillonnage des deux instruments ainsi que de la non-linéarité de la sonde YSI du VHT. Sont aussi en cause: Les différentes constantes de temps des deux thermomètres par rapport aux variations et fluctuations rapides de la température de l'air.

La seconde comparaison porte sur la période d'août 1989 à juillet 1990 soit une année et comprend trois thermomètres: Le THYGAN et le VT3 du terrain d'essais de la section météorologie de l'environnement reliés au logger du type KLIMET et le VHT du terrain de mesure ANETZ, station de Payerne. Les résultats décrits en détail dans le rapport y relatif (P. Wasserfallen, 1990) peuvent être résumés par le tableau suivant des moyennes (°C) calculées sur les 12 mois:

	THYGAN ENV	THYG.ENV -VT3 ENV	THYG.ENV -VHT ANETZ
moyenne	9.49	+0.04	-0.24
max.moy.*	22.78	+0.22	-0.45
min.moy.*	-0.86	-0.32	-0.51

* moyenne des max. et des min. mensuels

Commentaires: Les écarts moyens entre THYGAN ENV et VT3 ENV concordent bien avec les résultats obtenus lors des nombreux tests et comparaisons sur le terrain d'essais (P. Wasserfallen, 1983-85 et 1990); l'écart de +0.22°C pour la moyenne des maxima (22.78°C) correspond au creux de la courbe de réponse de la sonde YSI du VT3 auquel s'ajoute l'influence minime du rayonnement réfléchi sur le THYGAN; les conditions contraires se présentent avec l'écart de -0.32°C pour la moyenne des minima (-0.86°C) soit la bosse de la courbe de réponse YSI à laquelle s'ajoute l'influence minime du rayonnement nocturne négatif (P. Wasserfallen, 1990).

Par contre, les écarts moyens plus importants (max. = - 0,45; min. = - 0,51) entre THYGAN ENV et VHT ANETZ-PAY ne concordent pas avec les bons résultats obtenus lors de la première comparaison précitée, sur le terrain d'essais ENV, entre THYGAN et VHT. Une correction de la non-linéarité de la sonde YSI réduirait évidemment les écarts maxima et minima mais pas la différence moyenne systématique (- 0,24). Une analyse détaillée des problèmes de mesure du thermomètre VHT en service dans le réseau ANETZ fait l'objet du chapitre suivant (5.2.2).

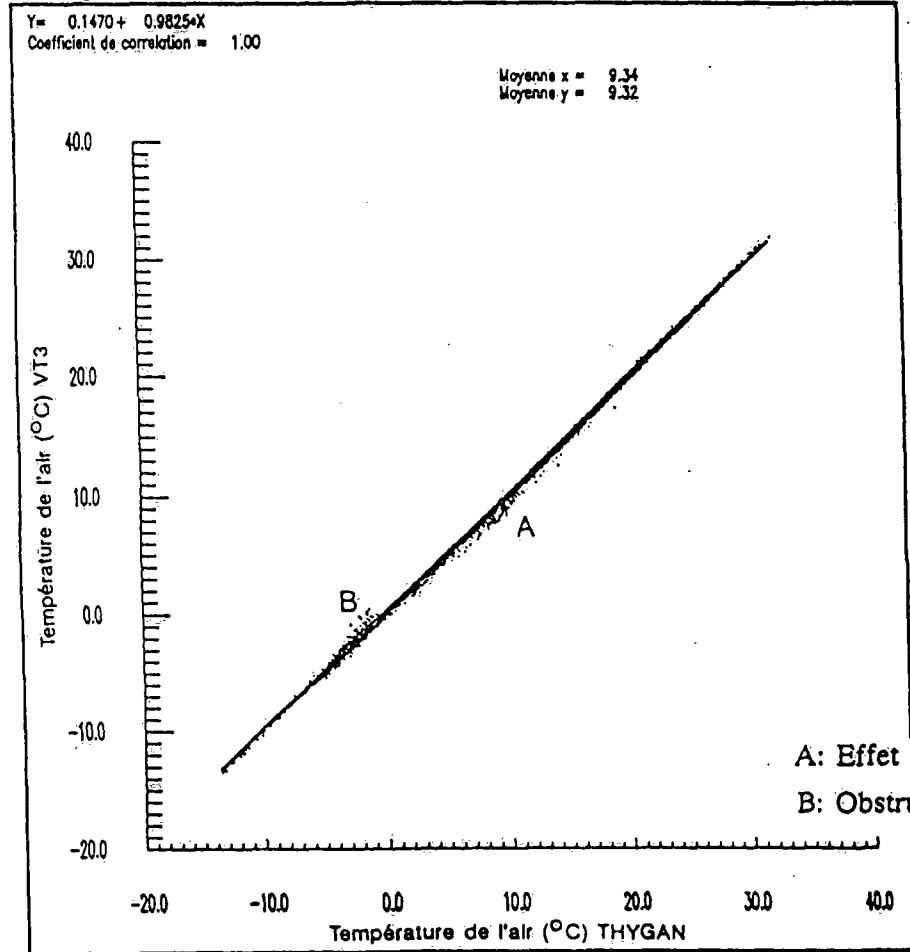
Thermomètre abri hygro/THYGAN: Comme dernière comparaison et à l'instar de la première (VT3/THYGAN), nous présenterons les résultats obtenus par la régression linéaire entre les moyennes horaires des températures mesurées dans l'abri (non ventilé) de l'hygromètre à cheveux (aussi en service dans le réseau ANETZ), et un THYGAN-série considéré maintenant comme référence. Pour la même période de mesure de 3 ans (mai 1988-avril 1991), nous obtenons les valeurs suivantes: $r=1.00$; $D = 0,09^{\circ}\text{C}$; pente = 1,01; offset = 0,00°C; $s = 0,52^{\circ}\text{C}$; $D_{\text{max}} = 5,85^{\circ}\text{C}$.

Commentaires: en moyenne, assez bonne concordance pour le thermomètre dans l'abri de l'hygromètre qui n'est pas ventilé ($D < 0,1^{\circ}\text{C}$); par contre, dans des situations de rayonnement intense et par temps calme, les températures dans l'abri peuvent être jusqu'à 6°C supérieures à celles de l'air. Rappelons aussi que dans de telles comparaisons et en ce qui concerne l'influence du rayonnement, le meilleur thermomètre est en principe celui qui indique de jour les valeurs les plus basses (meilleure protection contre le rayonnement direct, global et réfléchi), et de nuit les valeurs les plus élevées (meilleure protection contre le rayonnement nocturne ("Abstrahlung")).

Conclusions: Les tests en enceinte climatique et les investigations sur le terrain d'essais ENV de Payerne, ainsi que les résultats des comparaisons avec divers thermomètres ont démontré la supériorité en général des performances de mesure du THYGAN et ses avantages sur les autres systèmes confrontés.

Droite de regression

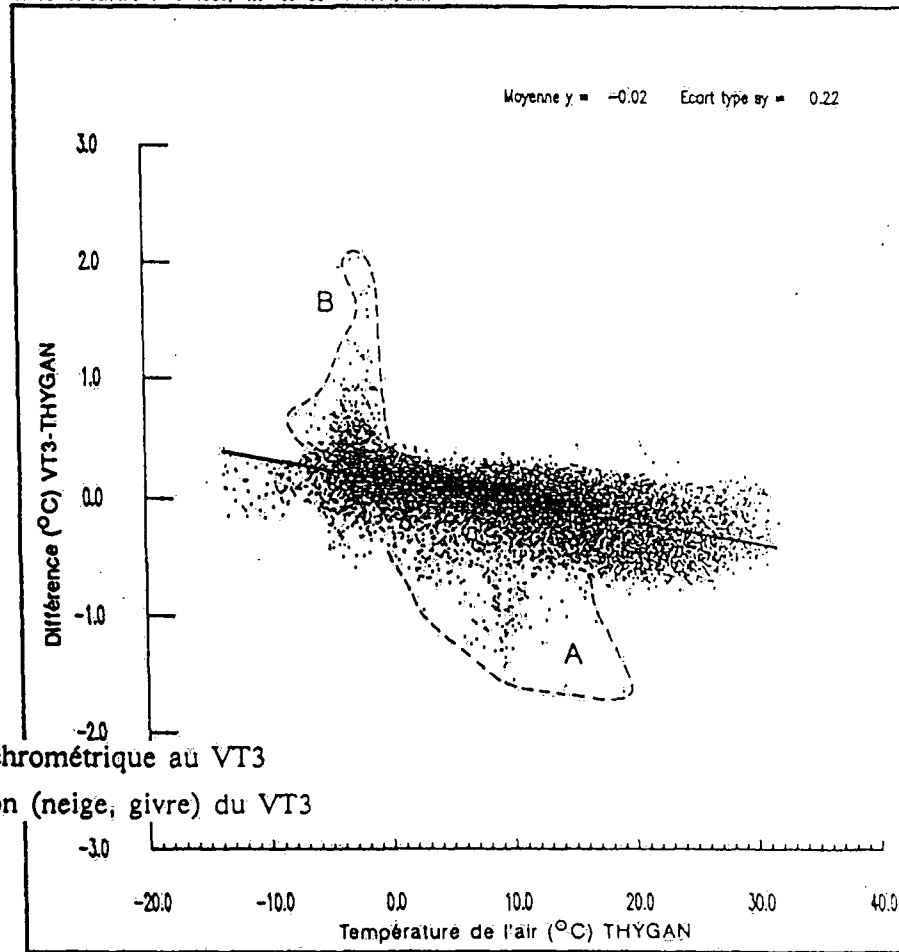
PAYERNE, terrain d'essais ENV
 Axe X: Température de l'air THYGAN
 Axe Y: Température de l'air VT3
 Période de calcul : 1-5-1988, 1H ou 30-4-1991, 24H



A: Effet psychrométrique au VT3
 B: Obstruction (neige, givre) du VT3

Droite de regression

PAYERNE, terrain d'essais ENV
 Axe X: Température de l'air THYGAN
 Axe Y: Différence des températures de l'air VT3-THYGAN
 Période de calcul : 1-5-1988, 1H ou 30-4-1991, 24H



a: Droite de régression des températures

b: Droite de régression des différences VT3-THYGAN

Fig. 5.1 Comparaison entre un thermomètre VT3 et un THYGAN

5.2.2 Erfahrungen im ANETZ (P. Zbinden, G. Haller)

5.2.2.1 Vorbemerkungen

Folgende Eigenschaften der drei verglichenen Temperaturmessgeräte Stevenson-Hüttentemperatur, ventiliertes geheiztes Thermometer (VHT) und THYGAN, sind bekannt und grossenteils in früheren Arbeiten genannt:

- Unterschiedliches Fehlverhalten der im VHT und in der Hütte eingesetzten Yellow-Spring-Instruments-Fühler (YSI, Halbleiter), gegenüber dem THYGAN-Fühler (Kupfer-Konstantan-Element): Nichtlinearität der YSI-Fühler bis zu $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 5.2).
- Während die YSI-Fühler in der Hütte selten ausgetauscht werden, führen alterungsbedingt notwendige, häufige Geberwechsel des VHT eher zu inhomogenen Datenreihen. Bei THYGAN wurden keine Inhomogenitäten von Bedeutung festgestellt. Alterung der bis 1989 nicht lackierten Ummantelung des YSI-Fühlers beim VHT durch Witterungseinflüsse führte zu langsamem (erst nach gewisser Zeit detektierbarem) Aufwärtsdriften der Messwerte (Abb. 5.7). Das THYGAN-Thermoelement ist besser gegen Korrosion geschützt, so dass keine korrosionsbedingten Messwertänderungen zu erwarten sind.
- Der Einfluss der Rückstrahlung von der Bodenoberfläche direkt auf den Fühler selbst ist bei THYGAN gering, bei VHT und Hütte praktisch inexistent. Bei VHT und besonders bei der Hütte (G. Müller, 1984) bei Extremsituationen aber oft merklicher Strahlungs- und Rückstrahlungseinfluss indirekt durch Wärmeleitung (VHT) bzw. Wärmestau (Hütte), bei THYGAN dank starker Ventilation viel geringer und zusätzlich reduziert durch Temperaturkorrektur.
- Psychometereffekte wurden bei Hütte und VHT festgestellt, bei THYGAN nicht.

Die Einführung des VHT ab 1978 führte bei der Mehrheit der ANETZ-Stationen dank geringerer Strahlungsempfindlichkeit zu tieferen Temperaturen im Vergleich zur Hüttentemperatur (G. Müller, 1984). Mit der Modifikation 1989 des VHT (Lackierung der Fühlerummantelung zur Ausschaltung des Alterungsprozesses) wurde ein schlechterer Wärmeübergang vom Rohr auf den darin befestigten Fühler in Kauf genommen. Dadurch erhöhten sich die VHT-Temperaturmittel wieder bei den meisten Stationen auf die Hüttenwerte und darüber.

Mit THYGAN werden dank verbessertem Strahlungsverhalten nun bei extremen Strahlungssituationen teils deutlich tiefere Temperaturen gemessen, insbesondere seit dem Einsatz der Seriegeräte (Version 7) ab Herbst 1987 (vgl. Kap.3).

5.2.2.2 Jahresmittel und Ausreisser, ganzes ANETZ

Erste Aussagen über die Qualität der THYGAN-Messungen sind im Abschlussbericht zum Projekt festgehalten (G. Haller und G. Müller, 1989). Für diesen Bericht wurden die Zehnminutendaten des gesamten ANETZes vom 1.1.1990 bis 31.12.1990 ausgewertet mit folgenden Zielen:

- Feststellen der mittleren Abweichung redundanter Instrumente pro Station
- Feststellen der Häufigkeit von Fehlmessungen und Erkennen der Fehlerursachen.

Als Vergleichsinstrument wurde für diese Auswertung das VHT verwendet, da es im Gegensatz zum Hüttenthermometer an jeder ANETZ-Station installiert ist. Abb. 5.5 zeigt die stationsspezifischen Resultate der Auswertung, Abb. 5.3 die Zusammenfassung der Resultate für das ganze Netz. Die mittleren Abweichungen bewegen sich zwischen $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$, der Mittelwert über alle Stationen liegt bei 0.08°C .

Bereits im Projektverlauf wurde festgestellt, dass sporadisch bei den Messungen des THYGAN Ausreisser auftreten. Der Jahresdatensatz wurde deshalb nach Temperatursprüngen untersucht. Als Sprung wird die Änderung der Temperatur um mehr als 10°C während einem einzigen Zehnminutenintervall gewertet. Die Auswertung wurde für THYGAN und VHT gemacht und jeweils nach den Temperaturklassen des zweiten Instrumentes geordnet. Im Mittel trat beim THYGAN ca. alle 2 Wochen ein solcher Sprung auf. Abb. 5.4 zeigt die Resultate.

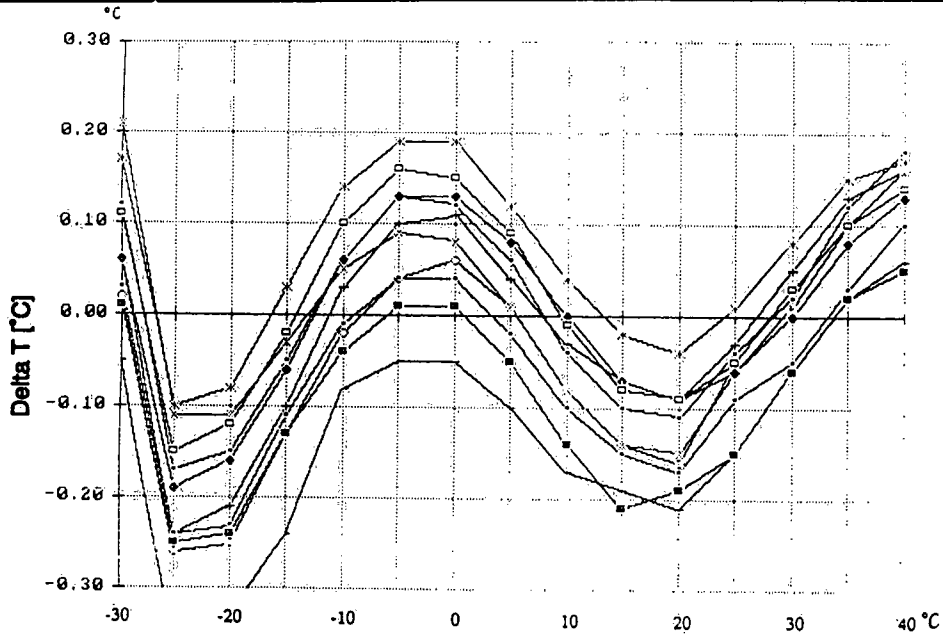


Abb. 5.2 Rest-Nichtlinearität der Yellow-Spring-Instruments-Fühler. (P. Wasserfallen und A. Vernez, 1986). Resultate von Klimakammer-Messungen an 10 Fühlern.

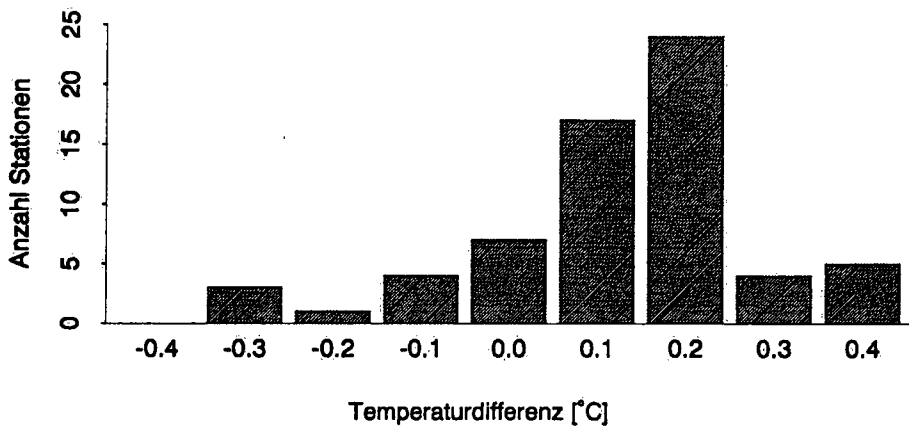


Abb. 5.3 Häufigkeitsverteilung der mittleren Differenzen VHT-THYGAN. Auswertung der Zehnminutenwerte aller 65 ANETZ-Stationen über das Jahr 1990.

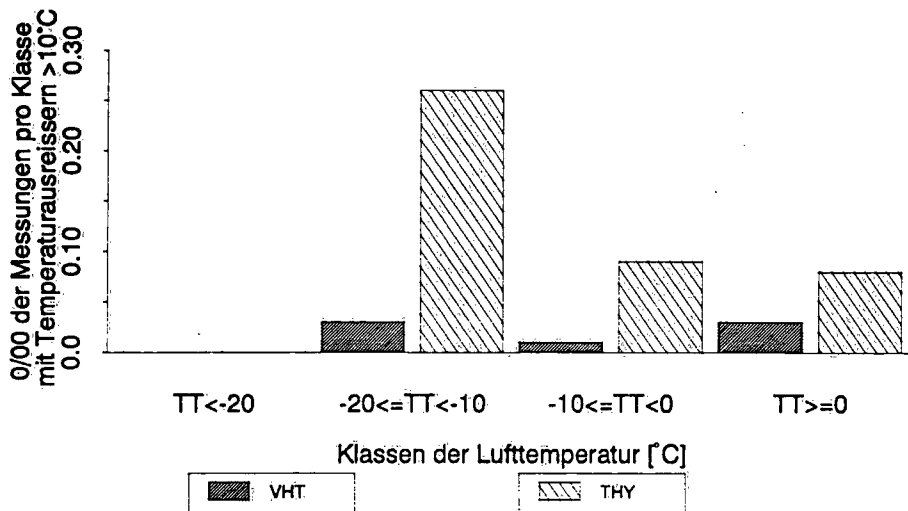


Abb. 5.4 Häufigkeit von Temperaturausreißern > 10° C in Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Auswertung der Zehnminutenwerte aller 65 Stationen über das Jahr 1990.

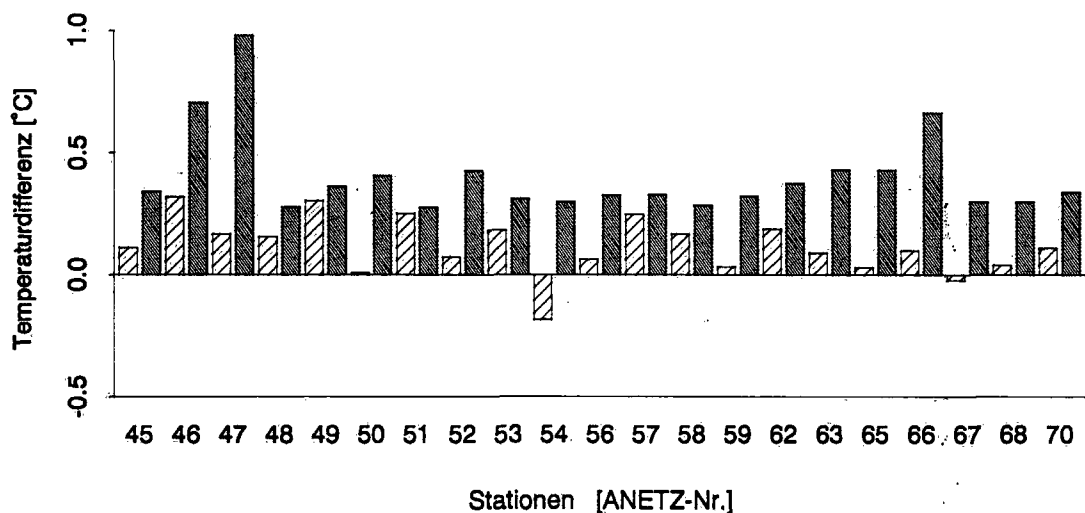
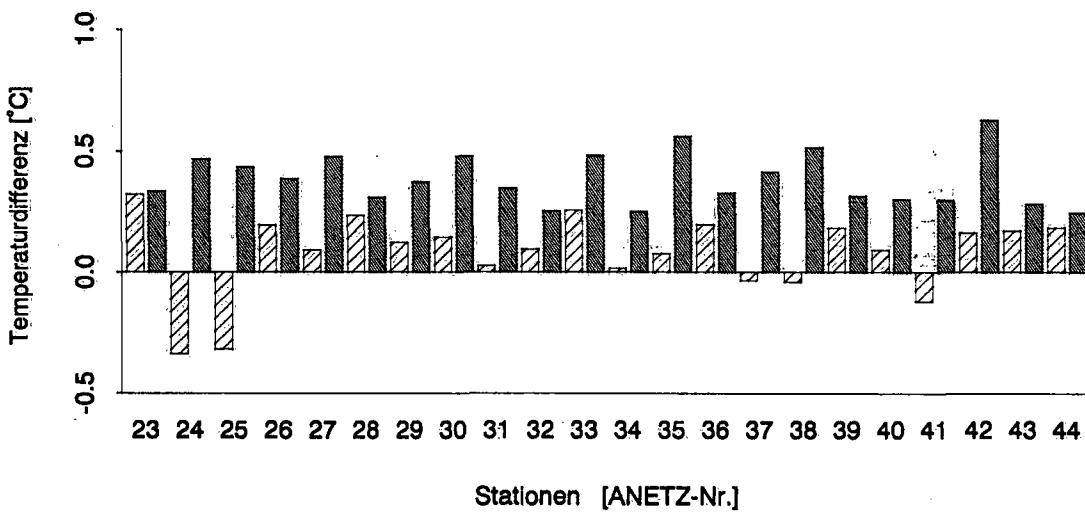
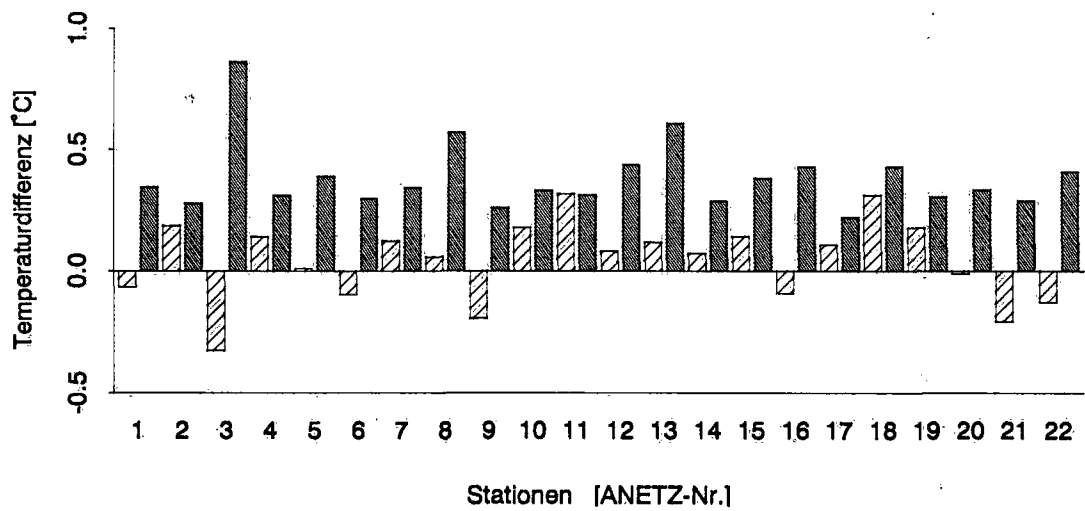


Abb. 5.5 Mittlere Temperaturdifferenzen VHT-THYGAN [°C] für die einzelnen ANETZ-Stationen. Auswertung der Zehnminutenwerte über das Jahr 1990.

Der Versuch, die Fehler bestimmten Ursachen zuzuordnen, führte zu folgenden Resultaten:

- Zirka ein Drittel der Ausreisser beim VHT fällt zeitlich zusammen mit einem Putzvorgang oder einer Initialisierung des THYGAN. Obwohl die beiden Geräte vollkommen unabhängig funktionieren, scheint über die Elektronik der ANETZ-Station eine Beeinflussung möglich. Ein Teil der übrigen Ausreisser des VHT scheint durch Störungen der Meßspannung verursacht, für den Rest konnte keine plausible Erklärung gefunden werden.
- Es war bisher nicht möglich, eine Ursache der Ausreisser der ANETZ-THYGAN-Temperaturmessung festzustellen. Da solche Fälle bei THYGANs, die an andere Stationslogger angeschlossen waren, nie auftraten, liegt der Schluss nahe, dass es sich um ein Problem im Zusammenspiel zwischen THYGAN und ANETZ-Interface oder allenfalls zwischen Interface und ASTA handeln muss. Weitere Abklärungen sind im Gange.

5.2.2.3 Monatsmittel ausgewählter Stationsreihen

Für die Jahre 1985-1989 wurden die Stationen Zürich SMA, Locarno-Monti, Zürich-Kloten, Zermatt, Samedan-St.Moritz, Davos und Montana ausgewählt, bei denen THYGAN schon 1985/86 eingeführt und das Hüttenthermometer über diese Zeit nie gewechselt wurde. Die Detailuntersuchung zeigte, dass je nach Wettersituation Unterschiede im Messverhalten der drei Temperaturmessgeräte festzustellen sind. Diese wettersituationsabhängigen Unterschiede im Messverhalten wurden in einer Folgeuntersuchung anhand von Stundenmittelwertvergleichen von Samedan über die Periode 1986-90 bestätigt (vgl. Kap. 5.2.2.4).

Die auf Basis von Monatsmitteltemperaturen eruierten Resultate sind in Abb. 5.6 - 5.9 dargestellt. Bei allen untersuchten Stationen misst THYGAN im Winterhalbjahr gegenüber VHT und Hütte deutlich tiefere Werte, im Sommer resultieren geringe Unterschiede. Dieser Jahresgang fällt bei Samedan und Zermatt besonders stark aus.

Die rechnerische Korrektur der Nichtlinearität der YSI-Fühler führt nur teilweise zu einer Reduktion des Jahresganges der Temperaturunterschiede VHT-THYGAN. Ein wesentlicher Teil des verbleibenden Jahresganges ist auf den Einfluss der Witterung zurückzuführen. Dieselben Witterungsbedingungen beeinflussen offensichtlich das Messverhalten der Vergleichsinstrumente in unterschiedlicher Art. Wie noch am Beispiel Samedan gezeigt wird, reagieren Hütte und VHT wesentlich empfindlicher auf die extreme Strahlungssituation "Schneedecke mit Sonne bei Windstille". Es ist somit klar, dass gerade die Stationen in höheren Alpentälern wie etwa Samedan und Zermatt im Winterhalbjahr höhere Monatsmittel der VHT- und Hüttentemperatur gegenüber der THYGAN-Temperatur erreichen, während die im Winter nebelreichen und weit schneeärmeren Flachlandstandorte diesen Messunterschied weit schwächer zeigen. Bei Stationen in Berglagen wiederum wirken die sehr häufig vorhandenen Winde ausgleichend. Dies ist nur ein Beispiel zur Erklärung der Tatsache, warum die Unterschiede in den Monatsmitteltemperaturen zwischen den drei Temperatur-Messgeräten von Station zu Station wie auch im Jahresverlauf variieren. Hierin kommt die Wichtigkeit der stationspezifischen Exposition der Messinstrumente und das unterschiedliche Klima zum Ausdruck.

Im Jahresmittel beträgt die Temperaturerniedrigung der THYGAN-Messungen bei den untersuchten Stationen zwischen 0,0 bis $-0,2^{\circ}\text{C}$, im Mittel $-0,08^{\circ}\text{C}$. Bedeutender ist die beim VHT seit der Modifikation 1989 festzustellende Temperaturerhöhung dieses Gebirgs. Für genauere Angaben war die seit der Modifikation verflossene Zeit noch zu kurz, doch sind Erhöhungen von mehr als $+0,25^{\circ}\text{C}$ im Jahresmittel bei einzelnen Stationen feststellbar und lagen die VHT-Monatsmittel des ANETZes im Winter 1990/91 bei der Mehrheit der ANETZ-Stationen über den Hüttenmitteltemperaturen.

Wie im folgenden Abschnitt aufgezeigt wird, hatte der THYGAN-Wechsel zum Endseriegerät in Samedan keine Veränderung des witterungsabhängigen Temperaturverhaltens zur Folge, während der modifizierte VHT wesentlich stärker auf Strahlungssituationen reagierte als seine Vorgängerversion.

Es ist darauf hinzuweisen, dass eine noch oberflächliche Betrachtung der Verhältnisse bei Hochgebirgsstationen darauf hindeutet, dass dort Temperaturvergleiche zu anderen Ergebnissen führen und in einigen Fällen THYGAN etwas höhere Temperaturen erreicht als das VHT. Die Instrumentierung dieser Hochgebirgsstationen ist nicht einheitlich und die Aufstellungen spielen eine wesentliche Rolle. Auf dem Jungfraujoch wurde THYGAN auf der Sonnseite installiert. Der bis Ende 1990 als offizielles Stationsthermometer verwendete YSI-Fühler ist dort nicht in einem ventilierten Rohr, sondern in der schattseitig aufgestellten Wetterhütte untergebracht. Es überrascht daher auch nicht, dass THYGAN in extremen Strahlungssituationen tagsüber um 4 und mehr Grad wärmere Temperaturen misst als der YSI-Fühler. Die neue offizielle Stationstemperatur auf dem Jungfraujoch, welche vom THYGAN geliefert wird, ist deshalb nicht mit den bisherigen Messwerten vergleichbar.

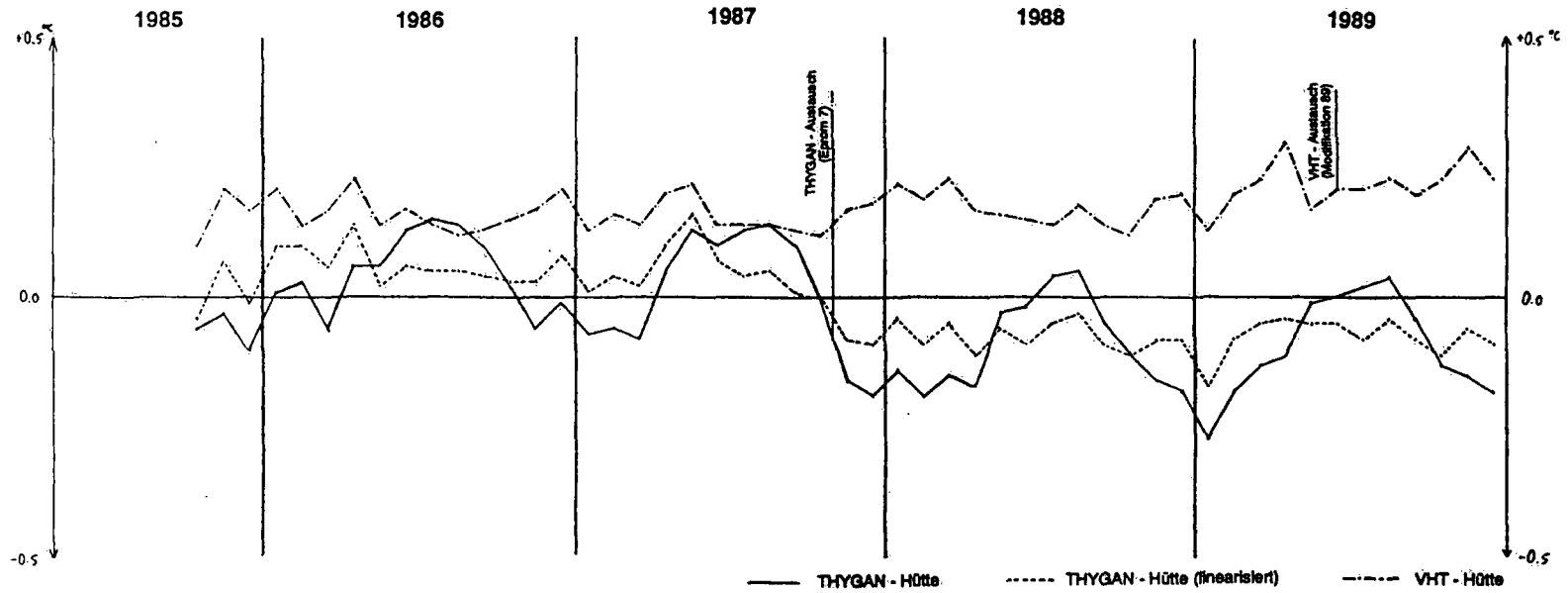


Abb. 5.6 Vergleich der Monatsmitteltemperaturen von vent. Thermometer, Hütte und THYGAN, Zermatt. Bezugstemperatur (Nullordinate) = Hütte.

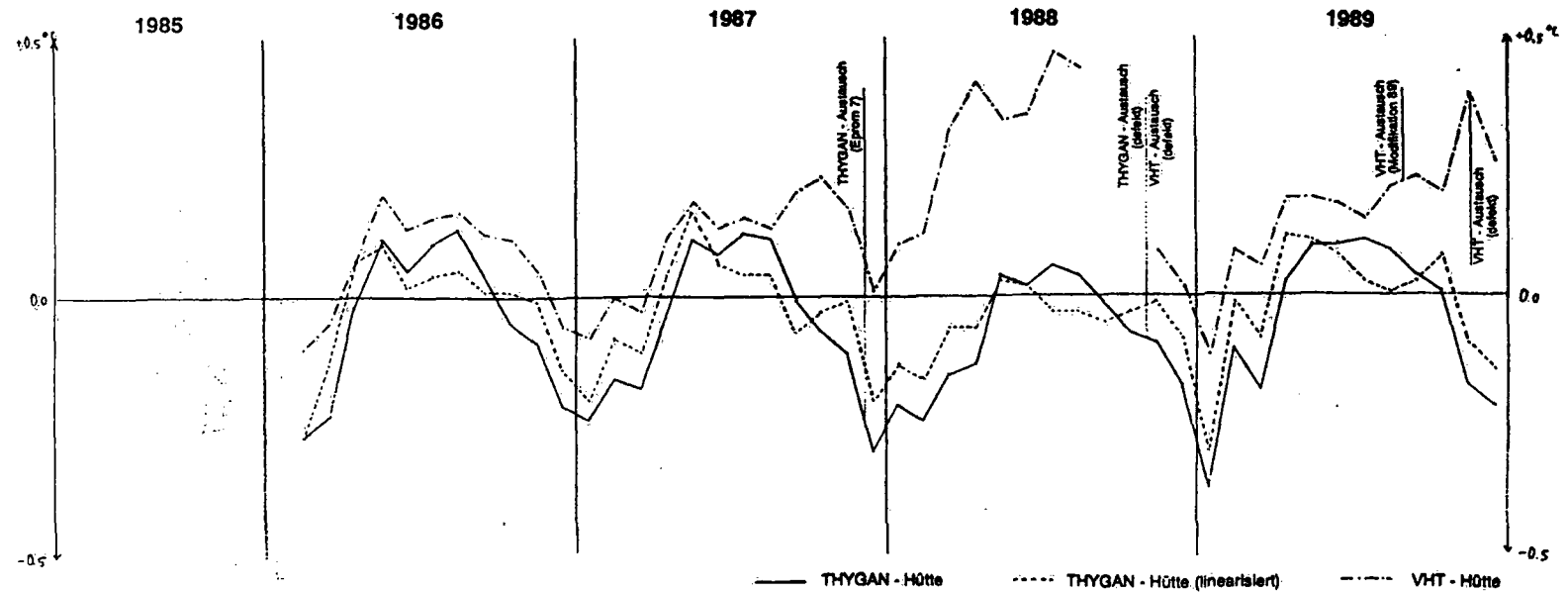


Abb. 5.7 Vergleich der Monatsmitteltemperaturen von vent. Thermometer, Hütte und THYGAN, Samedan. Bezugstemperatur (Nullordinate) = Hütte.

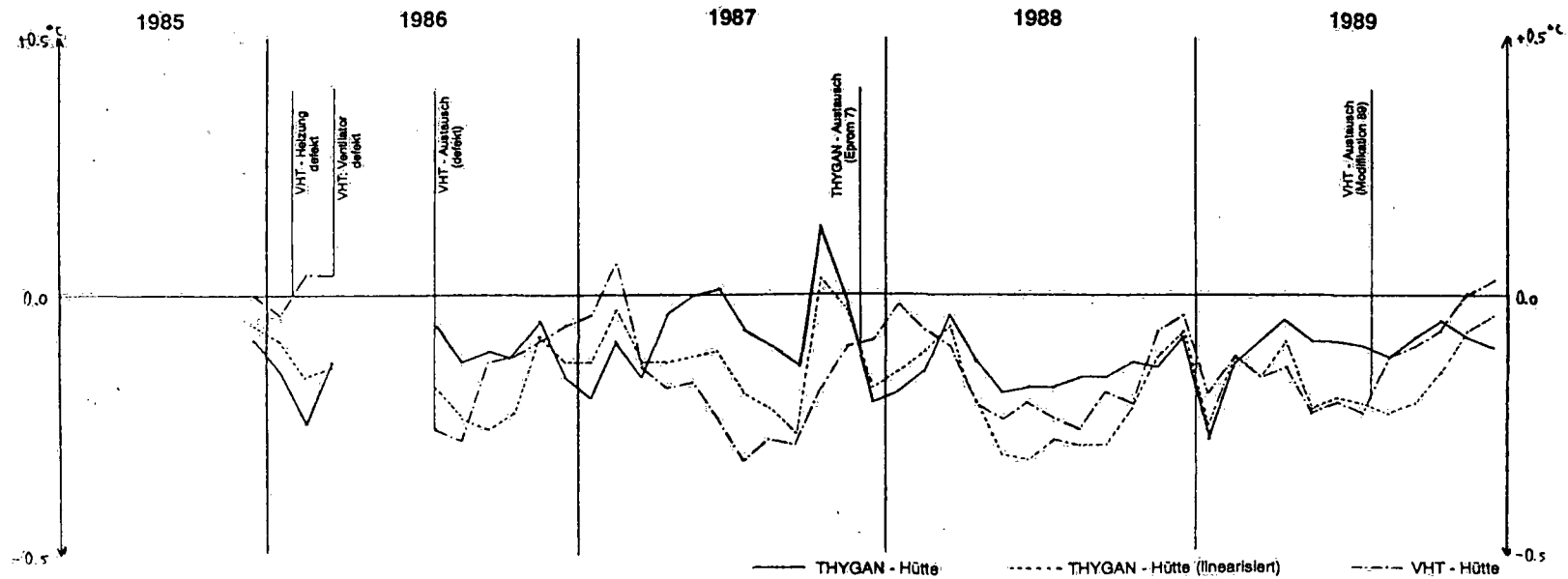


Abb. 5.8 Vergleich der Monatsmitteltemperaturen von vent. Thermometer, Hütte und THYGAN, Zürich SMA. Bezugstemperatur (Nullordinate) = Hütte

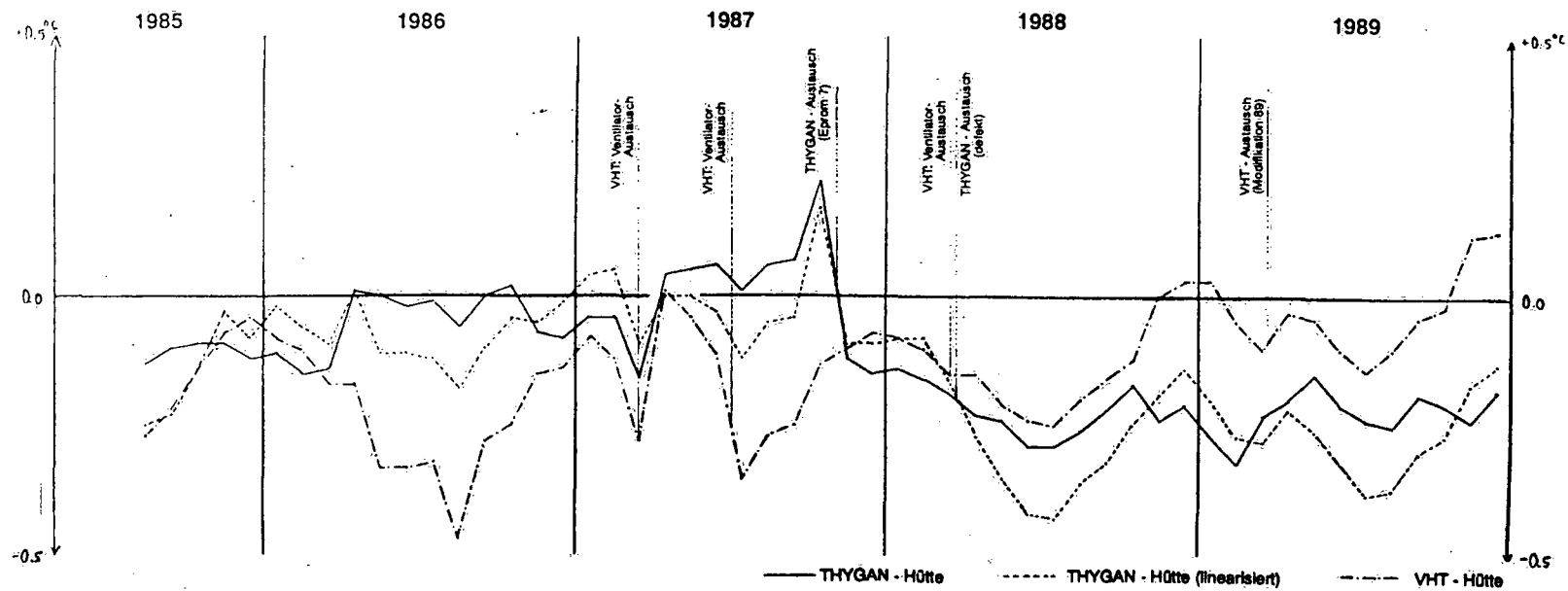


Abb. 5.9 Vergleich der Monatsmitteltemperaturen von vent. Thermometer, Hütte und THYGAN, Locarno-Monti. Bezugstemperatur (Nullordinate) = Hütte.

5.2.2.4 Einfluss der Witterung, Beispiel Samedan

Die Auswertung der Stundenmittelwerte über die Jahre 1986-90 zeigt auf, dass bei bewölktem Himmel und trockenem Wetter tagsüber von allen drei Messgeräten sehr ähnliche Temperaturen gemessen werden. Trockenes Wetter verkörpert den häufigsten Witterungstyp in Samedan. Bei starker Besonnung misst die Hütte im Winter meist mehr als 1°C höhere Werte als THYGAN, am Sommer nachmittagen teils mehr als 0.5°C tiefer. Diese tieferen Hüttenwerte an sonnigen Sommertagen sind schwer zu erklären. In den seltenen windschwachen Situationen bei sonnigem Wetter resultieren nämlich über den ganzen Tag höhere Hütten Temperaturen im Vergleich zu THYGAN. Ein Hintennachhinken der Hütten Temperatur bei starkem Tagesgang der Temperatur als Ursache für die tieferen Hüttenwerte kommt daher nicht in Frage, weil dies eher bei schwachen Winden mit schlechter Durchlüftung der Hütte zu erwarten wäre als bei windigen Verhältnissen. Die tieferen Hüttenwerte treten jedoch gerade in Zusammenhang mit kräftigeren Lokalwinden auf. VHT misst bei starker Besonnung im Sommer vormittags (bei noch schwachem Lokalwind), im Winter über den ganzen Tag (Rest-Nichtlinearität, kein nennenswertes Lokalwindsystem und Schneedecke) höhere Werte als THYGAN.

Trotz Einsatz von 3 THYGAN-Geräten von 1986-90 zeigen sich im Vergleich Hütte - THYGAN während der Sommermonate über alle 5 Jahre keine nennenswerte Veränderung der Temperaturabweichungen. Dies unterstreicht die im Forschungsprogramm NFP14+ festgestellte, sehr gute Austauschbarkeit des THYGAN (vgl. Kap. 7).

Im Gegensatz dazu wird in Abb. 5.7 das Höherdriften der VHT-Werte ab Herbst 1987 bis zur Defektmeldung im Herbst 1988 gut sichtbar; das modifizierte VHT zeigt für die Wettersituationen, welche schon zuvor positive Abweichungen gegenüber dem THYGAN verursachten, eine deutlichere Erhöhung der VHT-Werte als im Monatsmittel, was die erhöhte Strahlungsempfindlichkeit der modifizierten Version belegt.

Gegenüber THYGAN resultieren insbesondere höhere Hüttenwerte, wenn nebst starker Besonnung eine Schneedecke liegt (Tab. 5.2) und schwachwindige Verhältnisse herrschen (Tab. 5.3), im Winter und Frühling um rund 1,5°C. Das VHT misst seit der Modifikation in solchen Situationen ebenfalls rund 1°C höhere Temperaturen als THYGAN.

Der starke Jahresgang in der Temperaturdifferenz von Hütte und VHT gegenüber THYGAN in Samedan und Zermatt ist massgeblich durch die häufigen Schwachwindsituationen mit Schneedecke und Sonne im Winter und den für schweizerische Verhältnisse sonnigen Sommern mit Talwinden erklärbar.

Tab. 5.3 zeigt, dass schon geringe Windgeschwindigkeiten die Strahlungseinflüsse bei Hütte und VHT deutlich dämpfen.

Die im Vergleich zu Hütte und VHT deutlich tieferen THYGAN-Temperaturen bei Strahlungssituationen mit schwachem Wind und Schneedecke widerlegen die Befürchtungen, die starke Ventilation des THYGAN könnte durch Ansaugen von Luft aus Bodennähe bei solchen Situationen zu hohe Temperaturwerte ergeben. Ebenso misst THYGAN nachts nach Tab. 5.4 über alle Monate hinweg nur um rund 0.1°C tiefere Temperaturen als Hütte und VHT; in bedeckten Sommernächten sind die Hüttenwerte sogar etwas tiefer. Auch in windschwachen Nächten ist also kein Ansaugen kalter Bodenluft festzustellen. Das modifizierte VHT zeigt für das Winterhalbjahr deutlich erhöhte Nachttemperaturen für trockene, windschwache Nächte.

In Niederschlagssituationen (Tab. 5.5) sind bei VHT Psychrometereffekte vor allem bei starkem Regen und Wind zu vermuten. Am stärksten dürften diese bei warmen Temperaturen sein. An Starkregentagen konnten am OTL mehr als 1.5°C tiefere Tagesmitteltemperaturen des VHT gegenüber THYGAN festgestellt werden. Auch bei Niederschlag misst das modifizierte VHT höhere Werte als die vorherige Version.

Wetterbeschreibung			Hütte - THYGAN		Vent. Thermometer - THYGAN			
					vor der Modifikation		VHT modifiziert	
bedeckt	alle Windfälle	aper	0.00	0.02	0.10	0.15	0.25	0.30
	Wind < 1,1m/s	Schneedecke						
klar	alle Windfälle	aper	0.09	0.08	0.12	0.13	0.31	0.33
	Wind < 1,1m/s	Schneedecke						
klar	Wind < 1,1m/s	aper	0.12	0.05	0.13	0.11	0.25	0.37
		Schneedecke						
			Monat					
Win <1,1 m/s	klar	Jan.	0.04		0.11	0.13	0.38	0.47
	bedeckt	Feb.	0.11	0.04	0.15	0.10	0.43	0.42
	klar	März	0.08	0.02	0.16	0.14	0.39	0.37
	bedeckt	April	0.07	0.04	0.13	0.16	0.45	0.38
	klar	Mai	0.09	0.05	0.14	0.12	0.33	0.16
	bedeckt	Juni	0.13	-0.02	0.12	0.12	0.17	0.13
	klar	Juli	0.12	-0.06	0.10	0.08	0.18	0.09
	bedeckt	Aug.	0.12	-0.09	0.13	0.13	0.20	0.17
	klar	Sep.	0.15	-0.06	0.14	0.12	0.29	0.23
	bedeckt	Okt.	0.13	-0.03	0.16	0.26	0.25	0.28
	klar	Nov.	0.06	0.07	0.11	0.13	0.31	0.35
	bedeckt	Dez.	0.03	0.03	0.09	0.14	0.37	0.38
	klar			0.01				
	bedeckt							

Tab. 5.4 Niederschlagsfreie Nachtstunden: Temperaturvergleiche in Samedan, 1986-1990
Basis: Stundenmittelwerte.

Niederschlag Intensität			Wind		Hütte - THYGAN		vent. Thermometer - THYGAN	
					vor der Modifikation		VHT modifiziert	
Regen	leicht, tagsüber	schwach	0.02		0.03		0.13	
	leicht	schwach	0.03		0.02		0.10	
	leicht	beliebig	-0.04		-0.05		0.06	
	stark	schwach	-0.06		-0.13		0.01	
	stark	beliebig	-0.07		-0.23		-0.05	
Schneefall	stark	beliebig	0.04		0.15		0.34	
	stark	schwach	0.11		0.21		0.38	
	leicht	beliebig	0.05		0.16		0.35	
	leicht	schwach	0.15		0.23		0.45	
	leicht, tagsüber	schwach	0.49		0.26		0.60	

Tab. 5.5 Einfluss von Regen und Schneefall auf die Temperaturmessungen in Samedan.
Basis: Stundenmittel der Periode 1986-90. Nur Stundenwerte mit Sonne > 3 min.
tagsüber: Stunden mit möglicher Besonnung
leichter Niederschlag: < 1,0 mm/h
starker Niederschlag: 1,0 mm/h und mehr
schwacher Wind: < 2,3 m/s im Stundenmittel.

Insgesamt ergeben sich in Samedan im Jahresdurchschnitt etwa folgende Grössenordnungen der Differenzen (Hütte - THYGAN) und (VHT - THYGAN) (°C):

Wettersituation	Hütte	VHT vor Mod.	VHT
Besonnung mit Wind (Sommer)	-0.40	0.10	0.20
Besonnung bei Windstille (aper)	0.15	0.35	0.50
Schneedecke (windstill und sonnig)	1.10	0.35	0.55
Abstrahlung (klare Nacht)	0.10	0.15	0.30

Charakteristik	Hütte	VHT	THYGAN
Rest-Nichtlinearität der Messfühler	±0.15	±0.15	±0.05
Austauschbarkeit	±0.25	±0.25	±0.05

Die Tendenzen der Abweichungen sind bei den weniger im Detail untersuchten ANETZ-Stationen ähnlich, die Grössen der Abweichungen aber verschieden.

5.2.2.5 Schlussfolgerungen

THYGAN liefert bei extremen Wettersituationen vernünftiger Werte als Hütte und VHT, welche bei Regen gelegentlich Psychrometereffekten unterliegen (zu tiefe Werte) und an extremen Strahlungstagen (v.a. bei Schnee) deutlich höhere Werte registrieren können.

Für das Flachland und die alpinen Täler ergeben sich mit THYGAN insbesondere im Winterhalbjahr gegenüber VHT tiefere Monatsmitteltemperaturen, meist um 0.1 bis 0.5°C, vor der Modifikation des VHT etwas weniger. Im Sommer sind die Unterschiede wesentlich geringer.

Im Falle von Samedan wird die gemäss P. Wasserfallen (1987) sehr gute Austauschbarkeit von THYGAN auch im ANETZ-Einsatz belegt.

Die Modifikation 1989 des VHT führte praktisch im ganzen ANETZ zu einer deutlichen Erhöhung der Temperaturmesswerte, was die schon zuvor verschiedentlich nachzuweisenden Inhomogenitäten der Temperaturmessreihen durch Geberwechsel noch zusätzlich vergrössert.

Die von Station zu Station sehr unterschiedlichen Vergleichsergebnisse können teils mit der Streubreite des YSI-Messfehlers (Rest-Nichtlinearität und mangelnde Austauschbarkeit), teils mit den lokal unterschiedlichen Witterungseinflüssen) weitgehend erklärt werden.

Tab. 5.6 stellt im Überblick qualitativ dar, mit welcher Stärke, bzw. Häufigkeit verschiedene Einflussfaktoren auf die drei Messgeräte einwirken. Es gilt zu erwähnen, dass sich durch Überlagerung Fehler summieren oder kompensieren können:

	Hütte	VHT		THYGAN
		vor Modifikation	nach Modifikation	
Wind Strahlung Psychrometer-Effekte Trägheit Vereisung Korrosion, Alterung	mittel stark mittel (selten) mittel mittel mässig	gross, selten (Rückfluss) mittel mittel (häufiger) schwach schwach stark	gross, selten (Rückfluss) stärker mittel (seltener) schwach schwach mässig	schwach schwach keine schwach schwach schwach

Tab. 5.6 Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf Hüttenthermometer, VHT und THYGAN nach J. Joss

In den Einzelmessungen des THYGAN treten noch "Ausreisser" auf; diese stören vor allem dort, wo die Werte direkt und unkorrigiert an die Benutzer gelangen (z.B. in Form von Echtzeit-Wettermeldungen). Die Ursachen sind noch nicht geklärt.

Insgesamt kann mit THYGAN eine deutliche Verbesserung der Temperaturmessungen im ANETZ erwartet werden, auch wenn das Langzeitverhalten von THYGAN noch nicht erprobt ist.

5.3 Humidité

A l'instar du chapitre 5.2 Température, celui de l'humidité comprend deux mêmes parties; la première (5.3.1) décrit quelques résultats probants obtenus lors des différentes étapes du développement de THYGAN, par comparaisons avec divers hygromètres sur le terrain d'essais de la section ENV à Payerne. La deuxième partie (5.3.2) traite des comparaisons entre THYGAN et l'hygromètre à cheveux "Lambrecht 800L100" pour quelques stations de notre réseau ANETZ.

5.3.1 Comparaison sur le terrain d'essais SAP/ENV (P. Wasserfallen).

L'introduction du chapitre 5.2.1 s'applique aussi à celui-ci; elle ne sera donc pas répétée. Pour notre institut, les premières mesures de l'humidité (point de rosée) de l'air avec un hygromètre à miroir remontent à janvier 1978. Dès cette date, et jusqu'en 1986, une campagne de comparaisons systématiques de 8 types d'hygromètres dont THYGAN a été menée par la section ENV sur son terrain d'essais. Les résultats des différentes étapes sont décrits en détail dans les rapports y relatifs (P. Wasserfallen, 1983 - 85). Nous ne présenterons donc ici que quelques résultats significatifs, sous forme de régressions linéaires de moyennes horaires qui illustrent la concordance des mesures entre THYGAN et 3 hygromètres des plus connus (la droite idéale $Y = 0 + 1 \times X$ y apparaît en traitillé).

THYGAN/Psychromètre: La figure 5.10 représente deux droites de régression entre un THYGAN "présérie" et un psychromètre type "Frankenberger", pour une période de mesure estivale de 4 mois. La moitié gauche (a) illustre les températures du point de rosée, calculées à partir des valeurs du thermomètre mouillé (wet bulb) pour le psychromètre. La moitié droite (b) représente les humidités relatives (HR) correspondantes.

Commentaires: En général bonne concordance ($D = 0,25\%$ HR; pente = 1,025; $r = 0,99$). La dispersion des points ($s = 2,2\%$ HR) provient principalement de la différence des constantes de temps des deux instruments (temps de réaction du psychromètre plus lent que celui du THYGAN) par rapport aux variations et fluctuations rapides de l'humidité. L'écart maximum atteint 9,7% HR.

THYGAN/hygromètre à miroir MBW: A l'instar de la comparaison précédente, la figure 5.11 représente les droites de régressions entre le même THYGAN "présérie" mais comparé ici à un autre hygromètre à miroir du type "MBW" pour la période de mesure du 01.06.84 au 07.03.85. La moitié gauche (a) illustre les températures du point de rosée mesurées, celles de droite (b) représente les humidités relatives correspondantes qui, pour l'hygromètre à miroir "MBW" est calculée par rapport aux valeurs de température de l'air du thermomètre "VT3".

Commentaires: En général assez bonne concordance ($D = 0,98\%$ HR; pente = 0,991; $r = 0,98$). La dispersion des points ($s = 2,6\%$ HR) provient d'une part de la différence des constantes de temps des instruments (MBW et VT3 plus lents que THYGAN), et d'autre part du fait que le calcul de l'humidité relative MBW/VT3 se rapporte à deux instruments et de performances différentes. L'écart maximum atteint 18,6% HR. Remarquons que les deux systèmes peuvent parfois donner des valeurs supérieures à 100% HR (cf. chap. 2.5.2).

Hygromètre à cheveux/THYGAN: Comme dernière comparaison, la figure 5.12 représente la régression linéaire entre l'hygromètre à cheveux "Lambrecht type 800L100 No. 460655" (hygromètre ANETZ) et un THYGAN de série. Vu que, dans la campagne de comparaison d'hygromètres, THYGAN s'est révélé le plus performant, il figure ici tant que référence sur l'échelle horizontale. De son côté, l'hygromètre à cheveux No. 460655 diffère de ceux du réseau ANETZ par les points suivants:

- Les réglages d'origine "offset" et "span" du fabricant n'ont jamais été modifiés (aucun "étalonnage" ultérieur sur le terrain).
- La butée mécanique a été déplacée de 95 à 107% HR ce qui permet d'étudier le comportement de l'instrument aux hautes humidités.
- Les valeurs supérieures à la limite de saturation sont maintenues lors du traitement et de l'analyse des données; il en va de même pour THYGAN.
- Aucune correction (réduction) tenant compte des différences de température "abri/air" n'est appliquée.

La comparaison porte sur 12 mois (année 1989); l'hygromètre à cheveux est en service depuis plus de 10 ans sans aucuns soins.

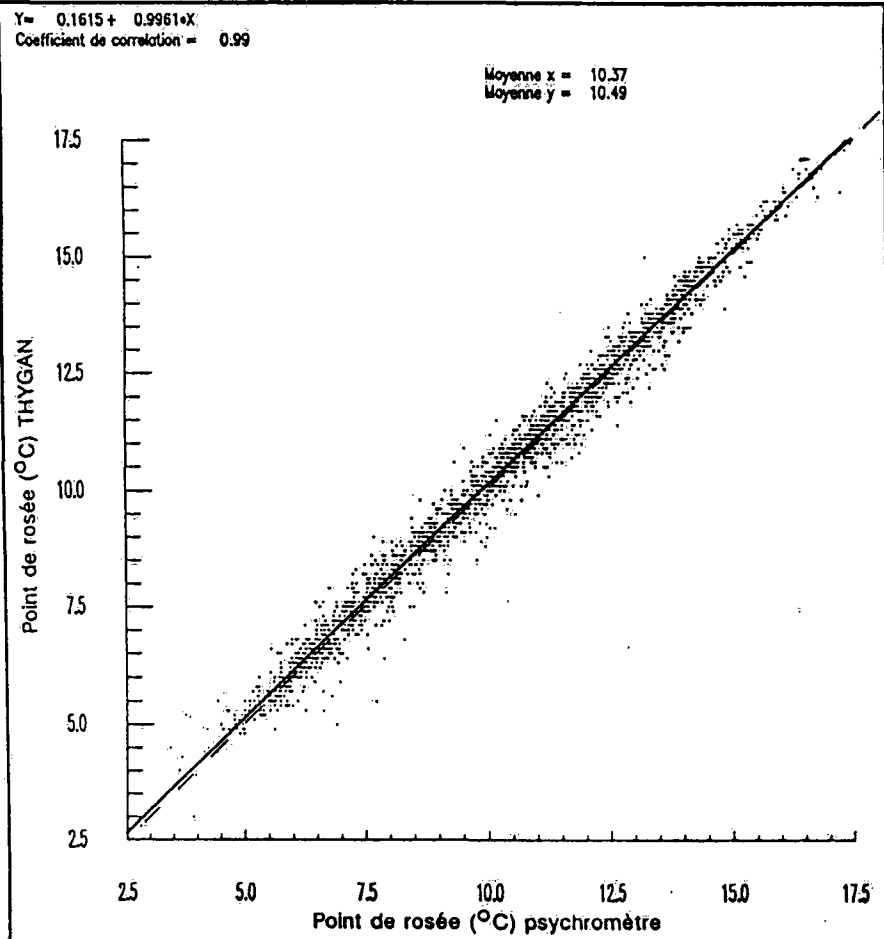
Droite de regression

PAYERNE, terrain d'essais ENV

Axe X: Point de rosée psychromètre

Axe Y: Point de rosée THYGAN

Période de calcul : 1-6-1984, 1H ou 30-9-1984, 24H



a: Droite de régression des points de rosée

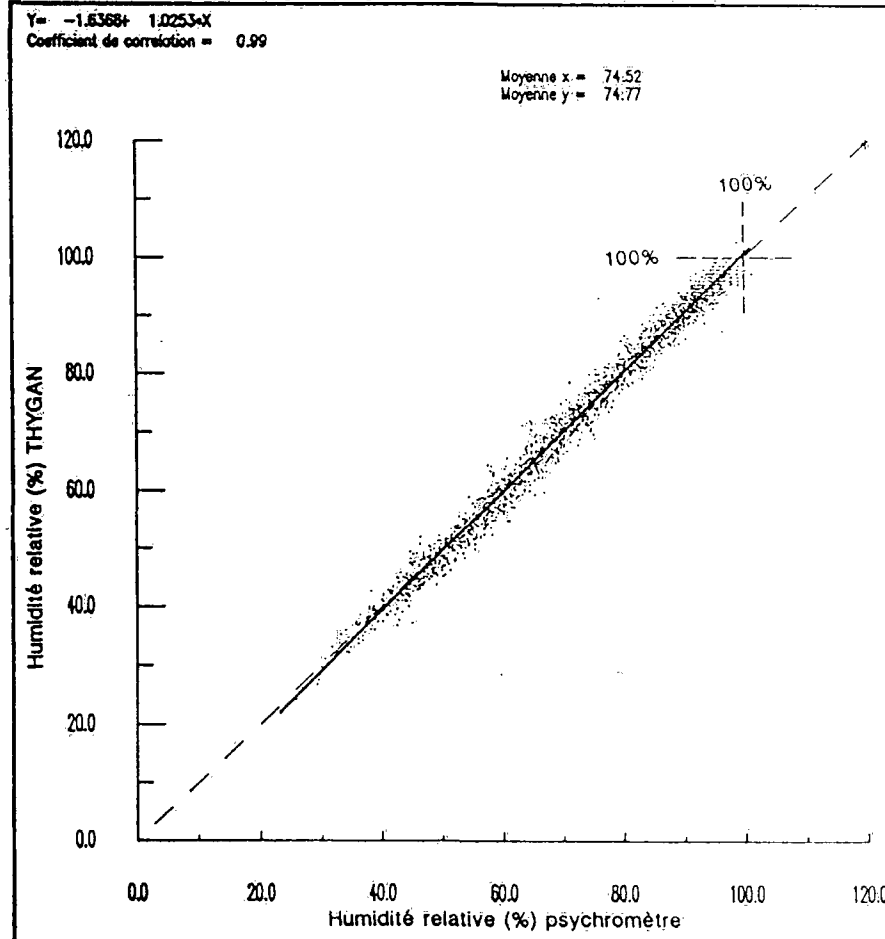
Droite de regression

PAYERNE, terrain d'essais ENV

Axe X: Humidité relative psychromètre

Axe Y: Humidité relative THYGAN

Période de calcul : 1-6-1984, 1H ou 30-9-1984, 24H

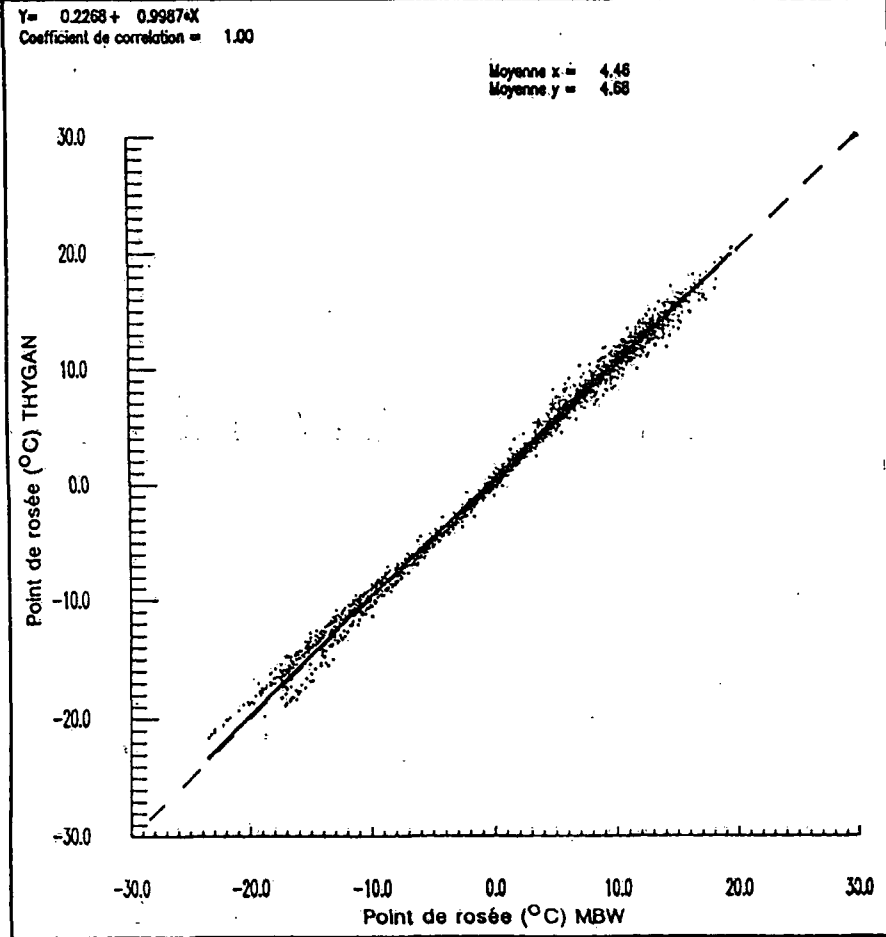


b: Droite de régression des humidités relatives

Fig. 5.10 Comparaison entre un THYGAN "présérie" et un psychromètre type "Frankenberger"

Droite de regression

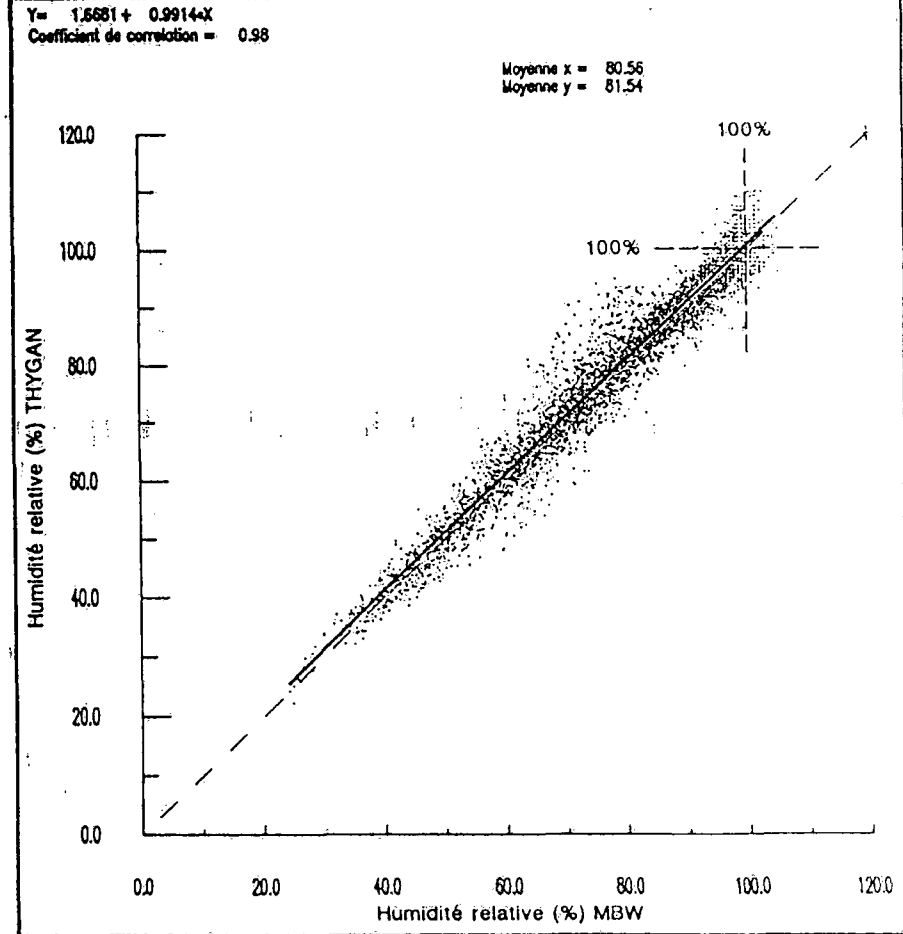
PAYERNE, terrain d'essais ENV
 Axe X: Point de rosée MBW
 Axe Y: Point de rosée THYGAN
 Période de calcul : 1-6-1984, 1H ou 7-3-1985, 24H



a: Droite de régression des points de rosée

Droite de regression

PAYERNE, terrain d'essais ENV
 Axe X: Humidité relative MBW
 Axe Y: Humidité relative THYGAN
 Période de calcul : 1-6-1984, 1H ou 7-3-1985, 24H



b: Droite de régression des humidités relatives

Fig. 5.11 Comparaison entre un THYGAN "présérie" et un hygromètre à miroir type "MBW"

Droite de regression

PAYERNE, terrain d'essais ENV

Axe X: Humidité relative THYGAN

Axe Y: Humidité relative hygromètre à cheveux 800L100

Période de calcul: 1-1-1989, 1H ou 31-12-1989, 24H

$Y = -8,7615 + 1,1638 \cdot X$

Coefficient de corrélation = 0,98

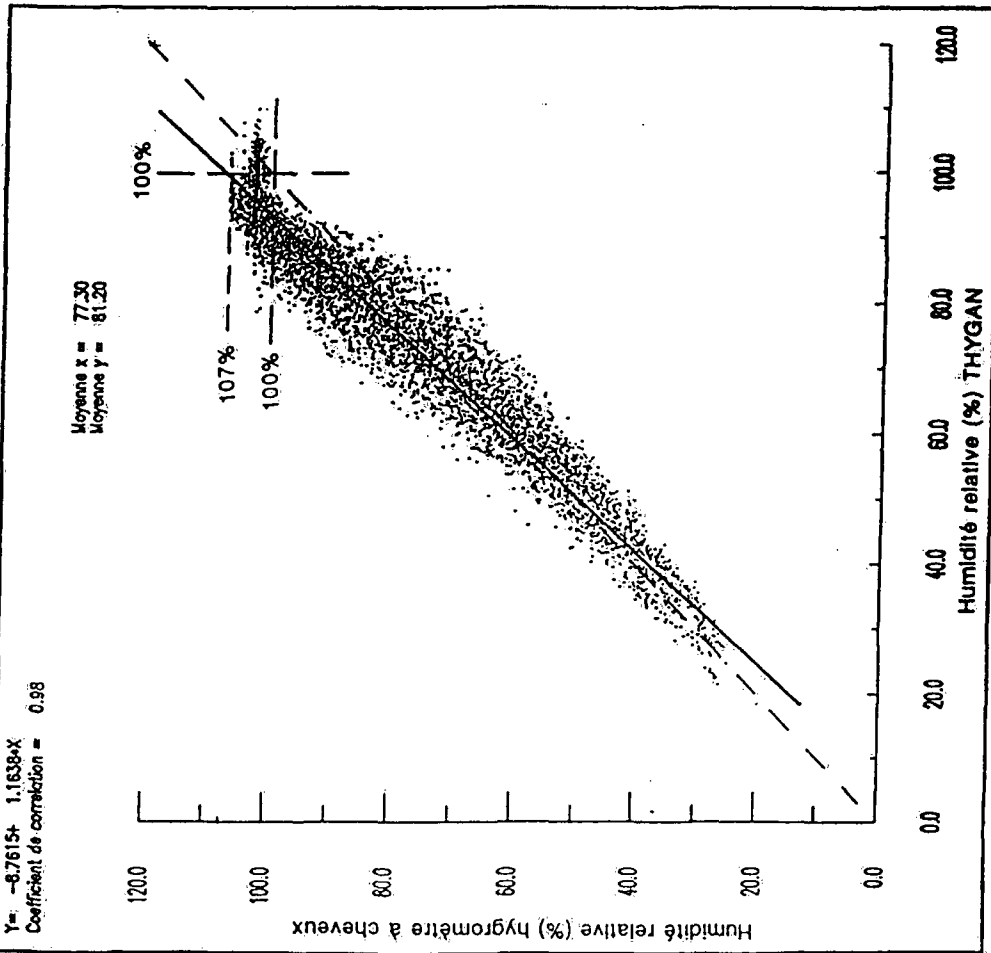
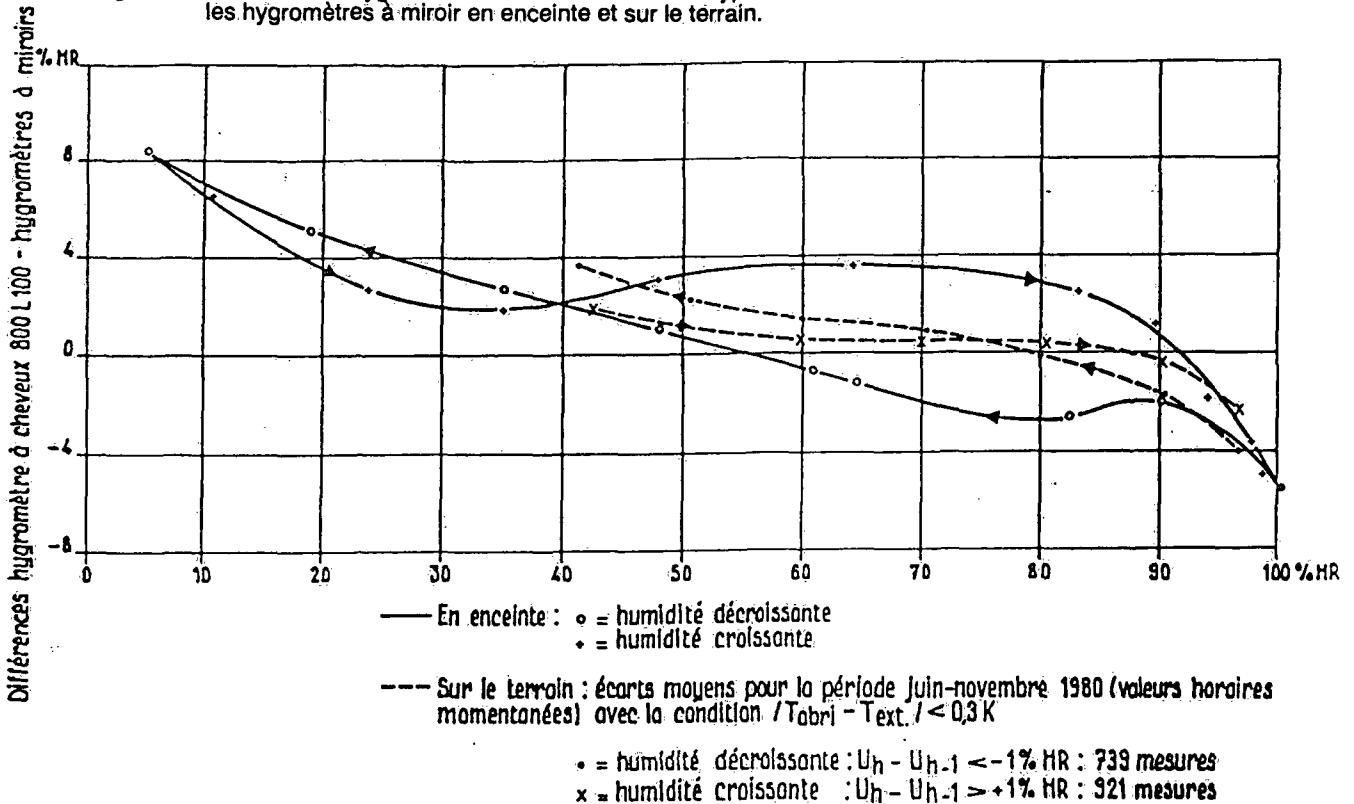


Fig. 5.12 Comparaison entre l'hygromètre à cheveux "Lambrecht type 800L100 No. 460655 (1er hygromètre ANETZ) et un THYGAN de série.

Fig. 5.13 Ecarts entre l'hygromètre à cheveux Lambrecht type 800L100 No. 460655 et les hygromètres à miroir en enceinte et sur le terrain.



Commentaires: Moins bonne concordance ($D = 3,90\%$ HR; pente = 1,164; offset à l'origine = $-8,76\%$ HR; $r = 0,98$). L'importante dispersion des points ($s = 5,3\%$ HR) provient principalement de l'inertie et de l'hystérèse des cheveux. L'écart maximum atteint même 28,4% HR. On remarque aussi d'une part; le manque de sensibilité des cheveux au voisinage de la saturation (variations du 800L100 moins importantes que celles du THYGAN), et d'autre part la tendance aux valeurs trop élevées des cheveux aux basses humidités (problèmes de linéarité et de réglage du "span" et de l'"offset"). L'enveloppe des points correspond assez bien aux courbes d'hystérèse obtenues 10 ans plus tôt en enceinte climatique (fig. 5.13) lors de l'étude expérimentale de ce même hygromètre (P. Wasserfallen et P. Viatte, 1981). En plus, la comparaison d'année en année ne révèle pas de dérive ni de changements significatifs de vieillissement.

Conclusion: Comme pour la mesure de la température de l'air, les tests en enceinte climatique et les investigations sur le terrain d'essais ENV de Payerne ont démontré la supériorité des performances du thermo-hygromètre THYGAN et ses avantages sur les autres systèmes de mesure de l'humidité de l'air confrontés.

5.3.2 Erfahrungen im ANETZ (R. Dössegger)

Im Automatischen Messnetz (ANETZ) wird seit Beginn (ab 1978, je nach Station) die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Haarhygrometer "Lambrecht 800L100" in einem Metallstrahlungsschutz erfasst (im folgenden "UU-Metall" genannt). Ab 1985 (je nach Station auch später, siehe Kapitel 1) gelangen THYGAN als Feuchtigkeitsmessgeräte in den Einsatz. Bei beiden Messgeräten weicht die Temperatur des Feuchtegebers je nach Wetterlage mehr oder weniger von der offiziellen Stations-temperatur (bis 1.1.1991 ventiliertes Thermometer) ab. Die Feuchtigkeiten wurden deshalb durch die ANETZ-Zentrale (AZEN) bezüglich dieser Temperaturdifferenz korrigiert. Beim THYGAN wurde gleichzeitig die resultierende Feuchtigkeit per Programm auf das bei Sättigung über Wasser maximal Mögliche beschränkt.

Obwohl an den meisten ANETZ-Stationen zuerst das THYGAN und später das ersetzte Haarhygrometer auf einer Reservekennziffer betrieben wurden, sind deren Messresultate aus Kapazitätsgründen nicht systematisch kontrolliert und nicht zu Tages- und Monatswerten aufgerechnet worden. Für den klimatologischen Vergleich der Messungen des THYGAN wurde deshalb auf die Resultate der konventionellen KLIMA-Parallelmessungen zurückgegriffen. Im konventionellen KLIMA-Netz wird ja seit langem die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Haarhygrometer in der Wetterhütte dreimal pro Tag abgelesen (UU-Hütte).

Im folgenden werden die Resultate 10-jähriger Parallelmessungen an den Stationen Weissfluhjoch-Davos, Genève-Cointrin und Locarno-Monti präsentiert.

5.3.2.1 Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit

Die Differenzen der Monatsmittel konventioneller Hüttenablesungen minus die ANETZ-Messungen wurden in Abb. 5.15 und daraus abgeleitet in Abb. 5.14 dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die ANETZ-Mittelwerte aus Zehnminutenwerten, diejenigen des KLIMA-Netzes aus den drei Terminablesungen berechnet worden sind.

Weissfluhjoch-Davos: Die Differenzen der Monatsmittel weisen einen deutlichen Jahresgang auf, der sich mit der Installation des THYGAN umkehrt:

	<u>Sommer</u>	<u>Winter</u>
vor THYGAN	UU-Metall << UU-Hütte	UU-Metall >> UU-Hütte
mit THYGAN	THYGAN ≤ UU-Hütte	THYGAN << UU-Hütte

Die Monatsmittel der Differenzen (THYGAN minus UU-Metall) erreichen im Winter bis -12% und im Sommer bis $+5\%$ relative Feuchtigkeit. Denkbare Ursachen für diesen Effekt könnte die unterschiedliche Empfindlichkeit der Messgeräte gegenüber Vereisung und zusätzlich die obere Beschränkung des THYGAN auf die maximale Sättigung über Wasser sein. Im Jahresmittel messen sowohl UU-Metall als auch THYGAN etwas tiefere Werte als UU-Hütte ($-1,5\%$, bzw. $-3,0\%$ relative Feuchtigkeit).

Genève-Cointrin: Auch in Genève-Cointrin lässt sich ein ähnlicher, allerdings viel schwächerer Jahresgang erkennen. Auffällig ist hier aber vor allem der Vorzeichenwechsel der Differenzen: Norma-

lerweise ergibt UU-Metall tiefere und THYGAN (vor allem von April - Juli) höhere Feuchtigkeiten als UU-Hütte. Ebenso auffällig sind in dieser Reihe die Sprünge verursacht durch die Eichungen des UU-Metall anlässlich des Jahresunterhalts ANETZ, erfreulicherweise verschwinden diese Sprünge mit dem Einsatz des THYGAN.

Locarno-Monti: Die Differenzen sind hier sehr gering, ein Jahresgang ist nicht erkennbar. Eine Ausnahme bildet die Periode vom Jahresunterhalt 1984 bis zum Wechsel auf THYGAN mit geringfügig höheren Werten des UU-Metall als UU-Hütte.

5.3.2.2 Monatsminima der relativen Feuchtigkeit:

Auf Abb. 16 wurden die Differenzen der monatlichen absoluten Minima der drei Stationen dargestellt. Bei deren Beurteilung muss wiederum berücksichtigt werden, dass die Minima des ANETZ aus den Zehnminutenwerten und diejenigen der konventionellen KLIMA-Parallelmessung aus den drei Terminablesungen bestimmt werden. Da die relative Feuchtigkeit aber einen zur Temperatur umgekehrt proportionalen Tagesgang aufweist, liegt die Mittagsablesung nahe beim Tagesminimum. Trotzdem können für einzelne Tage grössere Unterschiede auftreten, die aber bei der Bestimmung des absoluten Monatsminimums -wie die hier gezeigten Resultate vor dem THYGAN-Einsatz zeigten- unwesentlich, bzw. im Bereiche der Messgenauigkeit der Haarhygrometer, zu sein scheinen.

Die Minima von THYGAN sind normalerweise -wie zu erwarten war- tiefer als diejenigen von UU-Hütte (deutlich tiefer auf dem Weissfluhjoch und in Genève-Cointrin, erstaunlich wenig tiefer in Locarno-Monti).

Vor dem Einsatz von THYGAN waren die Differenzen (UU-Hütte minus UU-Metall) weniger einheitlich: auf dem Weissfluhjoch ungefähr gleich viele positive wie negative, in Genève-Cointrin meist positive und in Locarno-Monti meist negative Abweichungen.

5.3.2.3 Schlussfolgerungen

Die Resultate der Vergleiche der drei Stationen unterscheiden sich zwar relativ stark, doch können trotzdem folgende, für alle Stationen gültige Schlüsse gezogen werden:

1. UU-Metall weist Diskontinuitäten in der Zeitreihe von bis zu 10% auf, verursacht durch die Eichung anlässlich des Jahresunterhaltes. Diese Eigenschaft von UU-Metall hat F. Mayer (1988) bei Vergleichen der Monatsmittel von Stationsgruppen nachgewiesen (Payerne, Fribourg, Bochuz, Kloten, Reckenholz und MAZ Zürich).
2. THYGAN zeigt keine solchen Sprünge (UU-Hütte offenbar auch nicht).
3. Der Uebergang von UU-Metall zu THYGAN scheint bei den einen Stationen ohne grössere Veränderung, bei anderen Stationen aber mit einem Reihenbruch zu verlaufen. Mittel- und Extremwerte können sich dabei unterschiedlich verhalten.
4. Der Jahresgang der Differenzen (UU-Hütte minus UU-Metall, bzw. THYGAN) und seine Umkehrung mit dem THYGAN auf dem Weissfluhjoch (teilweise auch in Genève-Cointrin) dürfte auf unterschiedliche Empfindlichkeit der Feuchtigkeitsgeber gegenüber Vereisung und Betauung zurückführbar sein. Dabei scheint UU-Metall deutlich stärker beeinflusst zu sein als UU-Hütte und diese wiederum stärker als THYGAN.
5. THYGAN dürfte nach den bisherigen Vergleichen das beste der hier untersuchten Feuchtigkeitsmessgeräte sein.
6. Die Differenzen zwischen den verschiedenen Feuchtigkeitsgebern einer Station scheinen umso grösser zu sein, je rauher das Umgebungsklima der Station ist.

Abb. 5.14 "Mittlere" Differenzen der Monatsmittel der relativen Feuchtigkeit.
 konv. KLIMA-Netz (UU-Hütte) minus ANETZ (UU-Metall, bzw. THYGAN)

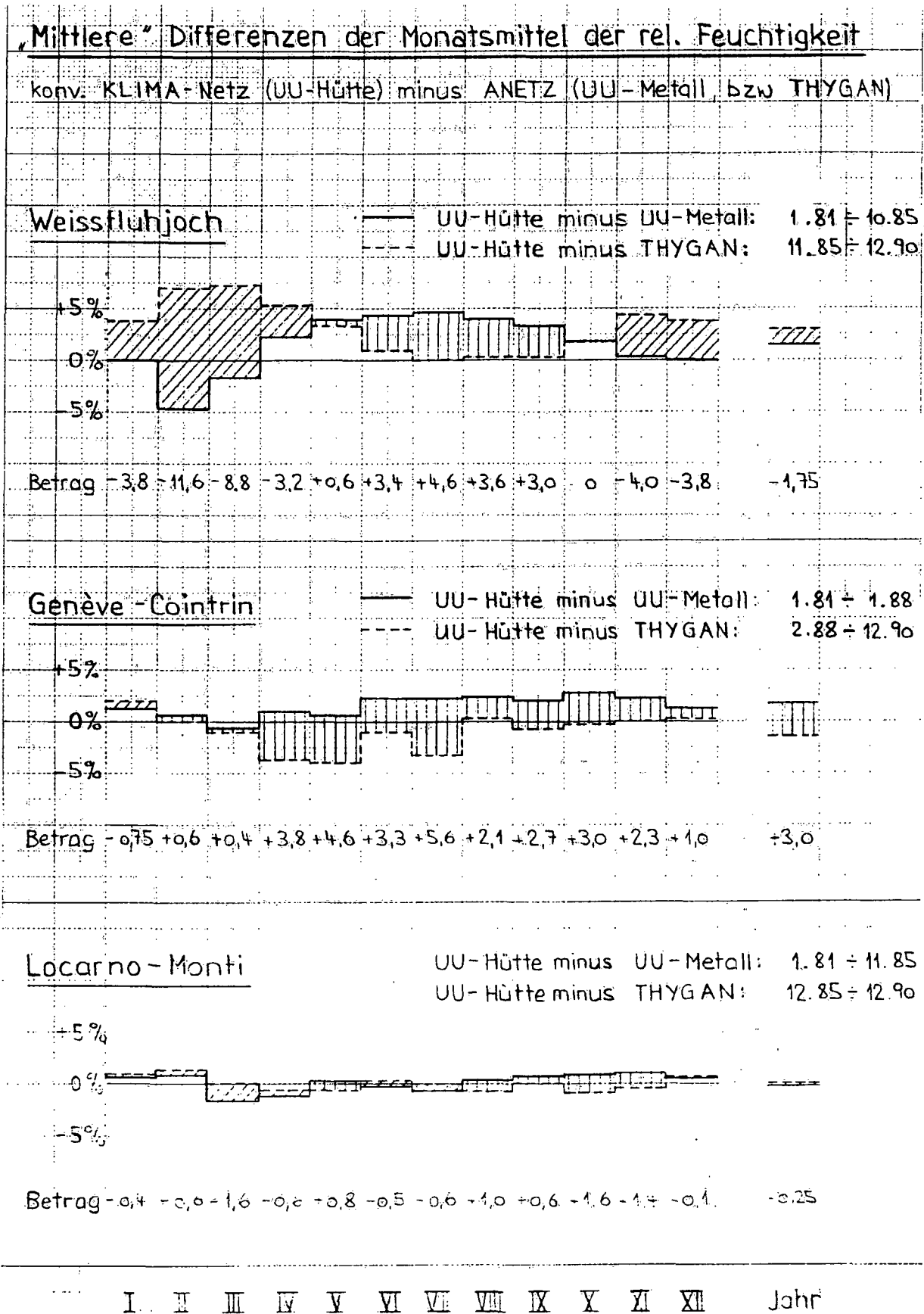
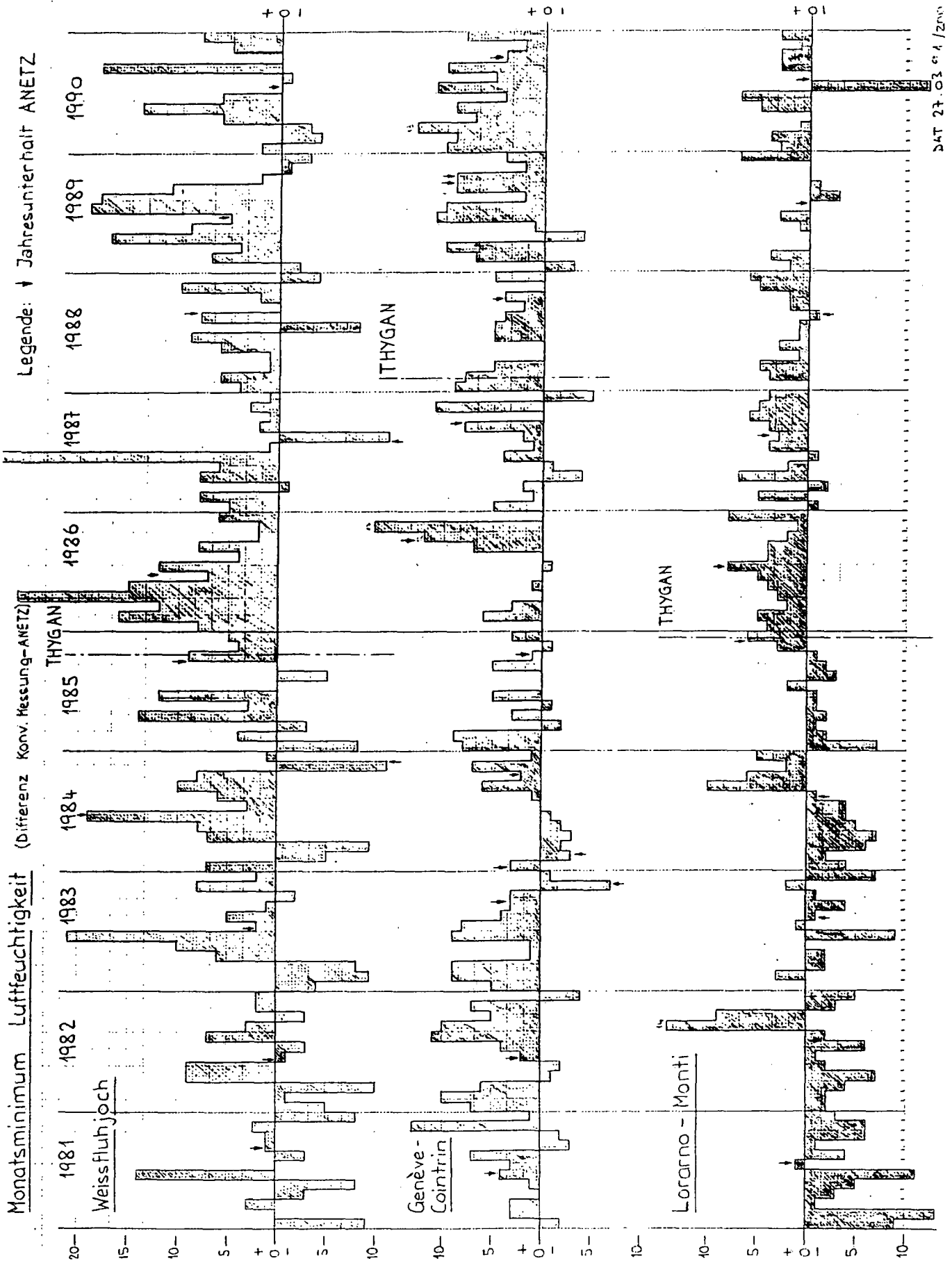


Abb. 5.16 Monatsminimum Luftfeuchtigkeit (Differenz konventionelle Messung - ANETZ)



6. THYGAN im Internationalen Vergleich: WMO-Hygrometervergleich Oslo 1986-1989

(B. Hoegger)

6.1 Rahmenbedingungen

Basierend auf der "Recommendation 14" der WMO/CIMO-Tagung von Ottawa, Juli 1985 (WMO, 1985) wurde im Jahre 1985 am "Norwegischen Meteorologischen Institut", DNMI, eine internationale Hygrometer-Vergleichs-Messkampagne eingeleitet. Diese Vergleichs-Messkampagne wurde vom "International Organizing Committee for the WMO Hygrometer Intercomparison" vorbereitet und organisiert.

6.1.1 THYGAN im Umfeld der "WMO International Hygrometer Intercomparison" in Oslo von 1986 - 1989.

An der internationalen Hygrometer-Vergleichs-Messkampagne nahmen 20 Typen von handelsüblichen, feldtauglichen Feuchtesensoren teil, einige mit bis zu drei Geräten pro Typ. Insgesamt resultierten daraus Parallelmessungen von 33 Sensoren. Sie stammten von 15 Herstellerfirmen oder -institutionen und wurden von verschiedenen nationalen Wetterdiensten zur Verfügung gestellt. Darunter befanden sich acht Feuchtemeßsysteme mit Taupunktspiegel (inklusive zwei THYGANs der SMA). Die THYGANs wurden von einer KLIMET-Wetterstation gesteuert, welche zudem die Leitfunktion betreffend den zeitlichen Ablauf der Messintervalle (Synchronisation) des gesamten Meßsystems (Zusammenfassung aller Datenlogger) auf dem Messfeld übernahm. Die Daten der KLIMET-Wetterstation wurden über eine serielle Schnittstelle auf einen Kleinrechner vom Typ IBM-PC übertragen. Das von der KLIMET-Wetterstation ausgegebene Datenformat, wurde auch auf die Archivierung der Daten der anderen Messwertgeber übertragen. Praktisch alle Messwertgeber haben eine analoge Messgröße zur Verfügung gestellt, die mit Datenloggern vom Typ "SOLATRON 35951A Data Acquisition System" in digitale Datenform umgewandelt wurde. Zusätzlich zu den verschiedenen Temperatur Messwerten der THYGANs (Luft, Taupunkt, Gehäuse) wurden auch die Status-Worte der Messwertgeber abgefragt. Die THYGANs waren die einzigen im internationalen Vergleich getesteten Feuchtemessgeräte, die ein Statuswort bereitstellten.

6.1.2 Referenz-Messgeräte

Da es aus verschiedenen Gründen schwierig ist, ein absolut geeichtes Referenz-Messgerät für die Luftfeuchtigkeit bereitzustellen, hat die CIMO VIII in Mexico City mit einer Resolution ein speziell entwickeltes Psychrometer als WMO-Feuchtereferenz-Messgerät vorgeschlagen. Australien hat sich zur Verfügung gestellt, dieses Instrument zu realisieren und hat in der Folge ein Prototyp-Instrument, das unter dem Namen "Wylie-Psychrometer" bekannt wurde, zur Verfügung gestellt. Das Gerät entsprach aber nicht den Vorstellungen von einem Referenz-Messinstrument für den Feldeinsatz. Zudem war es nur bei schönem Wetter einsetzbar.

Mit einer relativ aufwendigen Prozedur versuchte man, das Problem des Referenz-Messgerätes zu lösen. Die Expertengruppe hat einen Algorithmus vorgeschlagen, der es erlauben sollte, aus den besten Psychrometern und Taupunktspiegel-Hygrometern, einen "Relative Reference Value (RRV)"-Wert abzuleiten, mit dem die anderen Hygrometer verglichen werden konnten. Nun war der Sachverhalt meistens aber so, dass während Schlechtwetterperioden oder ausgeprägten winterlichen Verhältnissen nur noch die THYGANs einen brauchbaren RRV-Wert ergaben. Die THYGANs wurden aber von der Expertengruppe nicht offiziell als Referenzmessgeräte deklariert, da sie auch nicht immer ein eindeutiges Verhalten während kritischen Wetter-Phasen zeigten (Unterschiede in den Messwerten zwischen dem THYGAN in der Wetterhütte und dem THYGAN mit freier Aufstellung, Probleme mit Spiegelputzen und Eis-Wasser-Detektion), was zu undefinierten Zuständen in den RRV's führte.

6.1.3 Aufstellung der THYGANs

Die THYGANs wurden auf dem Messgelände wie folgt aufgestellt:

- Ein THYGAN befand sich in einer norwegischen Wetterhütte doppelter Grösse. Das Gerät wurde so aufgestellt, dass genügend Raum im Luft-Ansaugbereich, sowie im Ausblasbereich bestand und die anderen Messgeräte nicht gestört wurden.
- Das andere THYGAN befand sich im Freien. Es wurde mit einem modifizierten Ausleger, wie man ihn im ANETZ antrifft, an der Südseite einer der Wetterhütten befestigt. Das Gerät wurde in Standardhöhe, über normal bewachsener Erdoberfläche, montiert.

6.2 Resultate

Die Ergebnisse des internationalen Hygrometer-Vergleichs wurden 1989 an der TECIMO IV in Brüssel vorgestellt und durch die WMO publiziert (J. Skaar, 1989).

6.2.1 THYGAN-Messwerte und ihre Genauigkeit im Quervergleich

Im Kapitel 6 des obengenannten WMO/CIMO-Rapports sind die Resultate der beiden THYGANs im Quervergleich mit den anderen Feuchtemessgeräten in extenso beschrieben. Als Auszug zeigt Tab. 6.1 eine Zusammenfassung der statistischen Resultate für die beiden THYGANs im Vergleich mit Instrumenten anderer Länder.

Zusammengefasst wird festgehalten:

1. Im Temperaturbereich oberhalb von 0°C , verhält sich das THYGAN ebensogut oder sogar besser als die anderen Taupunktspiegel-Messgeräte. Die beiden Geräte (THYG(0) mit freier Aufstellung und THYG(1) in der Wetterhütte) zeigen ähnliche Resultate.
2. Im Temperaturbereich unterhalb von 0°C , ist eine merkliche Verschlechterung des Messverhaltens festzustellen. Unterhalb von -15°C ist das Verhalten der beiden Geräte THYG(0) und THYG(1) offensichtlich unterschiedlich. Eine Erklärung ist aus dem Schlussbericht nicht ersichtlich.
3. Im Vergleich mit den anderen Taupunktspiegel-Messgeräten wurden die THYGAN-Geräte von den Berichterstattern wie folgt charakterisiert: "The THYGAN instruments appeared by far superior to the other dew-point-hygrometers when performance, regularity and long-term stability are concerned".
4. Mangels eines Absolutreferenz-Messgerätes für die Luftfeuchte (siehe Kap. 6.1.2) müssen die Resultate der Temperaturkategorie $-15^{\circ}\text{C} < \text{TT} \leq 0^{\circ}\text{C}$ sowie $\text{TT} \leq -15^{\circ}\text{C}$ mit Vorsicht interpretiert werden. Während diesen Perioden zeigten auch die beiden THYGANs unterschiedliches Verhalten in den Einzelmesswerten, was sich jeweils ungünstig auf den RRV-Wert auswirkte.
5. Die Abb. 6.1 und 6.2 zeigen das Temperaturverhalten der Messwerte der THYGAN-Geräte (alle Feuchteklassen) bezüglich mittlerer statistischer Abweichung vom RRV-Wert und deren Streuung. Im positiven Temperaturbereich ($\text{TT} > 0^{\circ}\text{C}$) ist das Verhalten ideal und ähnlich den beiden Referenz-Psychrometern EAP1 und EAP2. Im negativen Temperaturbereich ($\text{TT} \leq 0^{\circ}\text{C}$) verschlechtert sich das Verhalten der beiden THYGANs zunehmend, was rückwirkend wiederum die Statistik in der Tabelle 6.2.1 bezüglich den Temperaturklassen $-15^{\circ}\text{C} < \text{TT} \leq 0^{\circ}\text{C}$ und $\text{TT} \leq -15^{\circ}\text{C}$ beeinflusst.
6. Angesichts der Tatsache, dass extreme Wettersituationen ($\text{TT} \leq -15^{\circ}\text{C}$) vergleichsweise nur in wenigen Fällen aufgetreten sind, ist die zusammengefasste Statistik "All Temperatures" nicht repräsentativ für die THYGANs, die ja besonders für extreme Witterungsverhältnisse entwickelt wurden.
7. Von den in der Statistik aufgeführten Taupunktspiegel-Messgeräten sind ausser dem THYGAN nur noch das Protimeter Dew-Point Meter DP 383R (NL) und das H083 Temperature and Dew-Point Messgerät (USA) an automatischen Wetterstationen eingesetzt. Beim US-NWS (Wetterdienst der USA) werden die H083-Messgeräte nur an Spezialstationen eingesetzt, wo Stationsbetreuer die tägliche Wartung übernehmen.

Die Wetterverhältnisse während dem ausgewählten Zeitintervall entsprachen dem normalen klimatischen Spektrum in Oslo. Eine Periode, die eher zu den strengen Anforderungen an ein Feuchtemessgerät gezählt werden muss. Das aktuelle Wetter wurde zusätzlich anhand der Messdaten der Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmenge sowie Niederschlagsdauer erfasst.

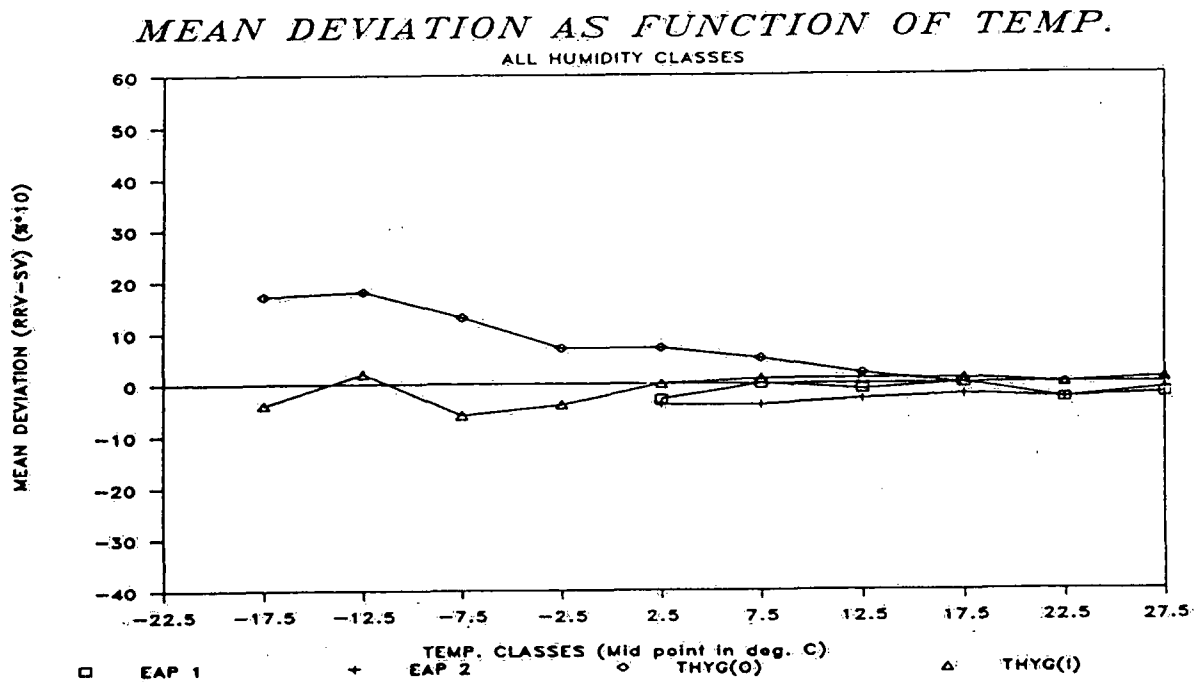


Abb. 6.1 Statistik aller Messdaten von ausgewählten Feuchtesensoren während der Testperiode Februar 1987 bis März 1989.

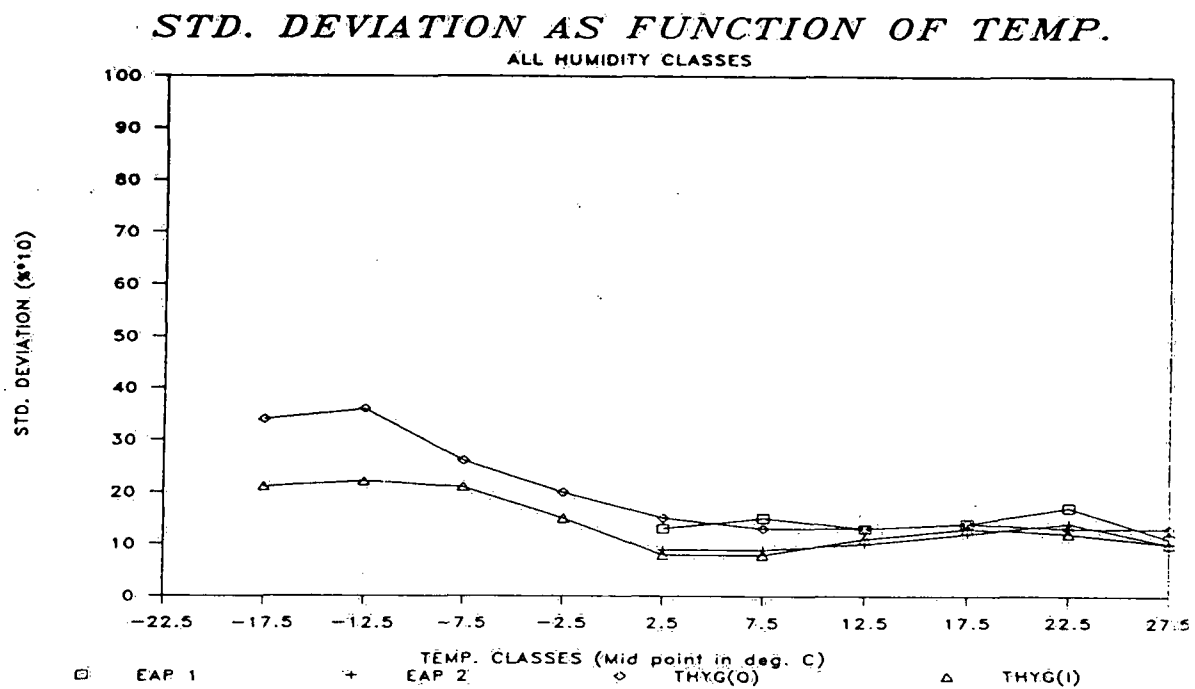


Abb. 6.2 Standardabweichung der Abweichungen der Messwerte vom RRV-Wert in Funktion der Lufttemperatur für alle Feuchtigkeitsklassen.

Erläuterungen zur Tabelle 6.1

THYG (0)	: DI610 THYGAN VTP 6 (outside in open air)	CH
THYG (I)	: DI620 THYGAN VTP 6 (inside the screen)	CH
ARP	: Australian Reference Psychrometer	AUS
FR. 3010 and FR. 3020	: Electrically Ventilated Aspiration Psychrometer Friedrichs 3010 and 3020	FRG
EAP 1 and EAP 2	: Electric Aspiration Psychrometer	GDR
PROTIM.	: Protimeter Dew-Point Meter DP 383R	NL
H083 (0) and (1)	: Hygrometerthermometer	USA
EG&G110	: Automatic Meteorological Temperature & Dew-Point Measuring Set	USA
EG&G200	: Model 200 M DewTrack Meteorological System	USA

SENSOR	RH CLASS	Tt <= -15 C			-15 C < Tt <= 0 C			0 C < Tt <= 15 C			Tt > 15 C			ALL TEMPERATURES		
		N	UNR	SERV	N	UNR	SERV	N	UNR	SERV	N	UNR	SERV	N	UNR	SERV
ARP	I	0	.0	.0	0	.0	.0	0	.0	.0	0	.0	.0	0	.0	.0
	II	0	.0	.0	0	.0	.0	594	.5	.0	2181	.1	.0	2775	.2	.0
	III	0	.0	.0	0	.0	.0	3639	.2	.0	1289	.1	.0	4928	.2	.0
	IV	0	.0	.0	0	.0	.0	2096	.8	.0	0	.0	.0	2096	.8	.0
SUM	0	.0	.0	0	.0	.0	6329	.4	.0	3470	.1	.0	9799	.3	.0	
FR.3010	I	0	.0	.0	0	.0	.0	123	.0	.0	664	.2	.0	787	1.1	.0
	II	0	.0	.0	0	.0	.0	4087	2.0	.0	6775	3.1	.0	10862	2.9	.0
	III	0	.0	.0	0	.0	.0	17403	3.7	.0	5991	5.4	.0	23394	4.1	.0
	IV	0	.0	.0	0	.0	.0	9731	2.1	.0	754	.9	.0	10485	2.0	.0
SUM	0	.0	.0	0	.0	.0	31344	3.0	.0	14184	3.8	.0	45528	3.3	.0	
FR.3020	I	0	.0	.0	0	.0	.0	700	.0	.0	664	2.1	.0	1364	1.0	.0
	II	0	.0	.0	1873	17.9	.0	9492	2.5	.0	6706	9.1	.0	18071	6.5	.0
	III	140	95.7	.0	11322	14.9	.0	30079	2.5	.0	5992	4.3	.0	47533	6.0	.0
	IV	0	.0	.0	4583	13.4	.0	20948	2.5	.0	754	.3	.0	26285	2.7	.0
SUM	140	95.7	.0	17778	14.8	.0	61219	1.8	.0	14116	6.2	.0	93253	5.1	.0	
EAP 1	I	0	.0	.0	0	.0	.0	123	27.6	.0	664	10.5	.0	787	13.2	.0
	II	0	.0	.0	0	.0	.0	4072	7.8	.0	6775	1.9	.0	10847	4.1	.1
	III	0	.0	.0	0	.0	.0	17403	1.4	.0	5991	1.3	.0	23394	1.2	.0
	IV	0	.0	.0	0	.0	.0	9731	1.5	.0	755	.3	.0	10486	1.5	.0
SUM	0	.0	.0	0	.0	.0	31329	2.0	.0	14185	1.6	.1	45514	1.9	.0	
EAP 2	I	0	.0	.0	0	.0	.0	123	6.5	.0	664	8.9	.0	787	8.5	.0
	II	0	.0	.0	0	.0	.0	4087	5.0	.0	6775	2.2	.0	10862	2.0	.0
	III	0	.0	.0	0	.0	.0	17403	1.2	.0	5991	2.2	.0	23394	.9	.0
	IV	0	.0	.0	0	.0	.0	9731	1.3	.0	755	.1	.0	10486	.3	.0
SUM	0	.0	.0	0	.0	.0	31344	1.4	.0	14185	.6	.0	45529	1.2	.0	
THYG(I)	I	0	.0	.0	0	.0	.0	700	.0	.0	664	.5	.0	1364	1.2	.0
	II	0	.0	.0	1992	10.7	.1	9979	.5	.0	6959	1.1	.0	18930	1.4	.0
	III	140	12.1	.0	13757	4.3	.0	30964	.3	.0	5992	.3	.0	20853	1.4	.0
	IV	27	0.0	.0	6764	10.0	1.3	21017	1.1	.0	755	.4	.0	28563	2.5	.3
SUM	167	10.2	.0	22513	6.5	.4	62660	.3	.0	14370	.2	.0	99710	1.7	.1	
THYG(O)	I	0	.0	.0	0	.0	.0	700	.0	.0	664	.2	.0	1364	.4	.0
	II	0	.0	.0	1903	8.4	.0	9930	1.3	.0	6959	.3	.0	18792	1.7	.0
	III	140	26.4	.0	11322	6.6	.0	30265	.7	.0	5992	1.0	.0	47719	2.2	.0
	IV	25	92.0	.0	4546	13.9	.0	21017	.4	.0	755	.4	.0	26343	2.8	.0
SUM	165	36.4	.0	17771	8.6	.0	61912	.7	.0	14370	.6	.0	94218	2.2	.0	
PROTIM.	I	0	.0	.0	0	.0	.0	671	52.3	.0	664	9.0	.0	1335	30.8	.0
	II	0	.0	.0	1845	39.6	.0	9503	31.3	.0	6959	3.9	.0	18307	20.7	.0
	III	140	71.4	.0	11137	56.1	.0	30265	11.1	.0	5992	1.8	.0	27534	20.7	.0
	IV	27	70.4	.0	4551	58.4	.0	21017	9.0	.0	755	1.1	.0	26350	17.3	.0
SUM	167	71.3	.0	17533	54.9	.0	61456	13.9	.0	14370	3.1	.0	93526	20.1	.0	
HO83(0)	I	0	.0	.0	0	.0	.0	108	.9	.0	157	.6	.0	265	.8	.0
	II	0	.0	.0	840	17.6	.0	3926	5.6	.0	2818	5.3	.0	7584	6.8	.0
	III	140	75.7	.0	1979	27.6	1.0	13745	16.0	.1	1460	6.4	.1	17324	17.0	.2
	IV	0	.0	.0	565	16.1	.7	8739	24.6	.2	116	56.0	.9	9420	24.5	.2
SUM	140	75.7	.0	3384	23.2	.7	26518	17.3	.1	4551	6.7	.0	34593	16.7	.2	
HO83(1)	I	0	.0	.0	0	.0	.0	20	.0	.0	0	.0	.0	20	.0	.0
	II	0	.0	.0	473	1.2	.0	991	.1	.1	0	.0	.0	1464	.1	.0
	III	0	.0	.0	5586	1.7	.4	4348	16.9	1.1	0	.0	.0	9934	3.9	.8
	IV	0	.0	.0	2174	1.4	.7	5448	18.9	1.8	0	.0	.0	7622	13.9	1.5
SUM	0	.0	.0	8233	1.5	.5	10807	12.3	1.5	0	.0	.0	19040	7.6	1.0	
EG&G200	I	0	.0	.0	0	.0	.0	592	37.0	.0	507	21.9	.0	1099	30.0	.0
	II	0	.0	.0	1063	9.7	.0	6005	11.1	.0	4141	28.9	.0	11209	17.5	.0
	III	0	.0	.0	9746	29.7	.0	17497	11.6	.0	4531	7.1	.0	31774	16.5	.0
	IV	2	.0	.0	4286	3.1	.0	14089	18.9	.0	639	.5	.0	19016	14.7	.0
SUM	2	.0	.0	15095	20.8	.0	38183	14.6	.0	9818	16.6	.0	63098	16.4	.0	
EG&G110	I	0	.0	.0	0	.0	.0	130	.8	.0	157	1.3	.0	287	1.0	.0
	II	0	.0	.0	1531	34.4	.0	6813	22.1	.1	2818	1.5	.6	11162	18.6	.3
	III	140	20.0	1.4	11167	30.4	.2	23659	24.0	1.1	1461	2.1	.9	36427	25.1	.9
	IV	27	.0	.0	4514	27.1	.3	16592	17.0	1.5	116	.9	.9	21249	19.1	1.2
SUM	167	16.8	1.2	17212	29.9	.3	47194	21.2	1.1	4552	1.7	.7	69125	22.1	.9	

EXPLANATION TO SYMBOLS USED IN TABLE :

SENSOR.: SENSOR NAME ABBREVIATIONS ACCORDING TO SENSOR LIST
 RH CLASS: HUMIDITY CLASSES IN USE - I: RH<=30% II: 30%<RH<=60% III: 60%<RH<=90% IV: RH>90%
 Tt.: AMBIENT AIR TEMPERATURE
 N.: TOTAL NUMBER OF DATA
 UNR.: PERCENTAGE UNRELIABLE DATA
 SERV.: PERCENTAGE MISSING DATA DUE TO SERVICE OR MAINTENANCE

NOTE: PERIODS WITH SENSOR DISCONNECTED ARE NOT INCLUDED IN THE FLAG STATISTICS

Tab. 6.1 Statistik aller Messdaten von ausgewählten Feuchtesensoren während der Testperiode Februar 1987 bis März 1989.

6.2.2 Unterhaltsarbeiten an den THYGAN-Messgeräten

An den beiden THYGAN-Messgeräten wurden an verschiedenen Terminen routinemässige Unterhaltsarbeiten durchgeführt:

- Äusserliche Reinigung der Messwertgeber (relativ rauhes Klima, grosse Luftverschmutzung mit starker Korrosionswirkung)
- visuelle Kontrolle der Funktionstüchtigkeit
- Aufruf der Kontrollparameter an der KLIMET-Wetterstation
- Vergleich mit dem Kontrollprotokoll gemäss ANETZ-Jahresunterhalt.

Die Ventilatoren an den beiden THYGANs wurden während der ganzen Versuchsperiode nicht ausgetauscht.

6.2.3 Hygrometervergleich beim Deutschen Wetterdienst (DWD)

Nach "Recommendation 7" der WMO/CIMO-X Tagung, Brüssel 1989, soll das THYGAN beim DWD in Potsdam mit einem gravimetrischen Verfahren auf Referenzstandard-Tauglichkeit untersucht werden. Prof. Dr. D. Sonntag vom DWD-Potsdam hat zu diesem Zweck Ende 1990 von der SMA ein THYGAN mit Steuergerät erhalten. Ein ausführlicher Bericht soll zur TECO-92 der WMO/CIMO in Wien veröffentlicht werden.

6.2.4 Schlussbetrachtungen

Von den acht Taupunktspiegel-Hygrometern am Anfang der WMO-Messkampagne sind im Verlaufe des Vergleichs zwei durch starke Korrosion an Elektronikteilen total ausgefallen. Die anderen Messgeräte der genannten Kategorie, ausgenommen die beiden THYGAN's, haben in ungünstigen Wetterlagen meistens mit "sensor failure" geantwortet oder die Streuung war so gross, dass kein RRV-Wert gebildet werden konnte. Die beiden THYGAN-Messgeräte waren die einzigen Messgeräte am WMO-Vergleich, die mit einem Mikroprozessor ausgerüstet waren und eine Statusmeldung über den Betriebszustand abgeben konnten.

7. Engagement du THYGAN dans le PNR14+ (P. Wasserfallen)

Lors de la définition du programme de mesure du PNR14+ (Programme National de Recherches 14+, "Dégâts aux forêts et pollution de l'air en Suisse"), et au vu des résultats déjà obtenus du THYGAN (cf. chapitres précédents), ce thermo-hygromètre fut choisi pour mesurer la température et le point de rosée (respectivement l'humidité) de l'air à 4 niveaux (fig.7.1) et aux 3 stations concernées soit: Lägern-Zindelen, Davos-Seehornwald et Alptal-Erlentobel (FNRS (1988) et P.Jean-net et al. (1990)). La station Alptal a été alors remise intégralement au WSL (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft), Birmensdorf, dans le cadre des investigations forestières et hydrologiques de la région. Les infrastructures des stations de Lägern et Davos quant à elles furent destinées au nouveau projet NABEL (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe), en cours de modernisation et d'extension. Celui-ci groupera 16 stations dont 5 couplées à des stations ANETZ, et où la mesure de la température et de l'humidité de l'air est aussi effectuée par THYGAN.

Pour le PNR14+, le choix du THYGAN s'est révélé d'emblée concluant et les deux rapports "THYGAN-forêts" (P. Wasserfallen, 1986 a et 1987) confirment la fiabilité de fonctionnement ainsi que la finesse et la précision des mesures. Même pour des niveaux de mesure verticalement si rapprochés (5 à 17 m), les profils de température et d'humidité de l'air par situations stables sont remarquables par leur continuité (alignement des points) (P. Wasserfallen, 1987). En plus, au niveau supérieur, la comparaison avec le thermomètre redondant VT3 (notre référence) offre un contrôle de plausibilité très sélectif des températures mesurées. D'autre part, la faible constante de temps du THYGAN permet de suivre des phénomènes rapides et extrêmes pour lesquels le cycle de mesure de 10 min. s'avère même parfois trop long et où la fonction "mesure continue" possible donnerait des résultats encore plus intéressants dans certains cas.

Par exemple, le graphique de la fig. 7.2 illustre un épisode d'air sec (16 octobre 1989) mesuré à la Station Davos-Seehornwald par une situation de subsidence. On y remarque comment l'air froid (env. -3°C) et relativement humide de la nuit est chassé progressivement mais régulièrement par l'air chaud (env. $+11^{\circ}\text{C}$ entre 12 et 15h) et sec de la subsidence qui envahit par bouffées, et de haut en bas, le couvert forestier. Dans ce genre de situation, des différences d'humidité relative (HR) de l'ordre de 25% (8h40) peuvent apparaître entre le niveau supérieur de mesure (35 m/sol) au dessus du couvert forestier, déjà dans l'air sec, et le niveau inférieur (10 m/sol), où stagne encore l'air froid et humide. Au plus fort de l'action, vers 14h, les humidités relatives mesurées par les 4 THYGAN sont stables et inférieures à 10%, même au premier niveau de 10 m/sol, entre les sapins. Le profil d'humidité reste cependant normal avec 9% à 10 m; 7,5% à 20 m; 7% à 25 m et 6% à 35 m. C'est pour cette dernière valeur que la dépression entre la température de l'air (11°C) et celle du point de rosée ($-25,0^{\circ}\text{C}$) atteint 36°C , soit une différence presque à la limite pour ce type d'élément Peltier à faible consommation.

On remarque ensuite la brusque régression de l'air sec entre 15h30 et 15h40, avec un saut de 17% HR à 10 m/sol, et surtout la remarquable concordance spatio-temporelle du moment entre les 4 THYGAN. Puis vers 17h, une dernière bouffée d'air sec affecte encore les 3 niveaux supérieurs, en opposition avec le premier niveau (11% HR entre 10 et 20 m/sol). Dès 17h30, l'humidité relative augmente graduellement mais avec certaines irrégularités particulières aux différents niveaux. Le profil fini par se stabiliser vers 23h.

Dans ce contexte, il est intéressant de comparer, pour THYGAN, les conditions de mesure de la température de l'air à l'intérieur et au-dessus d'une forêt à celles d'un terrain conventionnel.

Avant cela, et comme démontré en (P. Wasserfallen, 1990) et au chapitre 2.1, rappelons l'influence résiduelle du rayonnement global réfléchi (valeurs légèrement trop élevées par journée ensoleillée) et respectivement du bilan de rayonnement négatif (tendance à des valeurs faiblement trop basses par nuit claire). A cet égard, les conditions de mesure du PNR14+ sont favorables à THYGAN pour les 2 raisons principales suivantes:

- Le rayonnement global réfléchi (albedo) reste faible au-dessus d'une forêt, même enneigée et ne dépasse pas en général 15% du rayonnement global.
- Vu le micro-climat de la forêt et la hauteur des niveaux de mesure (10-45 m/sol), THYGAN est à l'abri d'éventuelles influences et phénomènes diurnes de convection.

Par contre, les contrastes d'exposition auraient pu influencer différemment les mesures THYGAN. En effet, les deux niveaux inférieurs sont situés dans le couvert forestier soit généralement à l'ombre et à l'abri du vent, tandis que les deux niveaux supérieurs sont situés au-dessus du couvert forestier soit exposés au rayonnement global mais aussi au vent.

Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, la continuité des profils verticaux mesurés (alignement des points) confirme que, d'une part les deux actions rayonnement global et vitesse du vent ont tendance à se neutraliser, et d'autre part, l'influence de la température du boîtier sur la mesure de la température de l'air est correctement corrigée par le logiciel du THYGAN.

La fructueuse collaboration technique entre partenaires du PNR14+ a permis entre autre, une intéressante application de la solution THYGAN-KLIMET: celle de la détection du brouillard mouillant. Pour les conditions suivantes:

- 1) $T_{\text{air}} - T_{\text{rosée}} \leq 0^{\circ}\text{C}$ 2) $T_{\text{air}} \geq 0^{\circ}\text{C}$ 3) Précipitations $\leq 0,1$ mm

KLIMET délivre un signal qui enclenche le collecteur de brouillard mouillant du WSL. Le système est mis automatiquement hors service si les 3 conditions ne sont plus remplies simultanément. La sensibilité du THYGAN à la mesure des hautes humidités représente donc aussi un avantage important sur les hygromètres conventionnels.

Autre application pour notre section ENV: l'investigation du lac d'air froid de Davos par un THYGAN doublé d'une caméra d'observation; cette étude est aussi basée sur les données PNR14+ et ANETZ-Davos (P. Wasserfallen, 1986 b).

En outre, les comparaisons entre THYGAN, le thermomètre ventilé VT3 et l'hygromètre à cheveux Lambrecht 800L100 se poursuivent comme prévu sur le terrain d'essais ENV à Payerne.

Pour conclure, et en se référant aux nombreux résultats probants obtenus par la section ENV, on peut affirmer que les performances et possibilités de mesure font de THYGAN un thermo-hygromètre particulièrement bien adapté aux investigations du domaine de la météorologie de l'environnement.

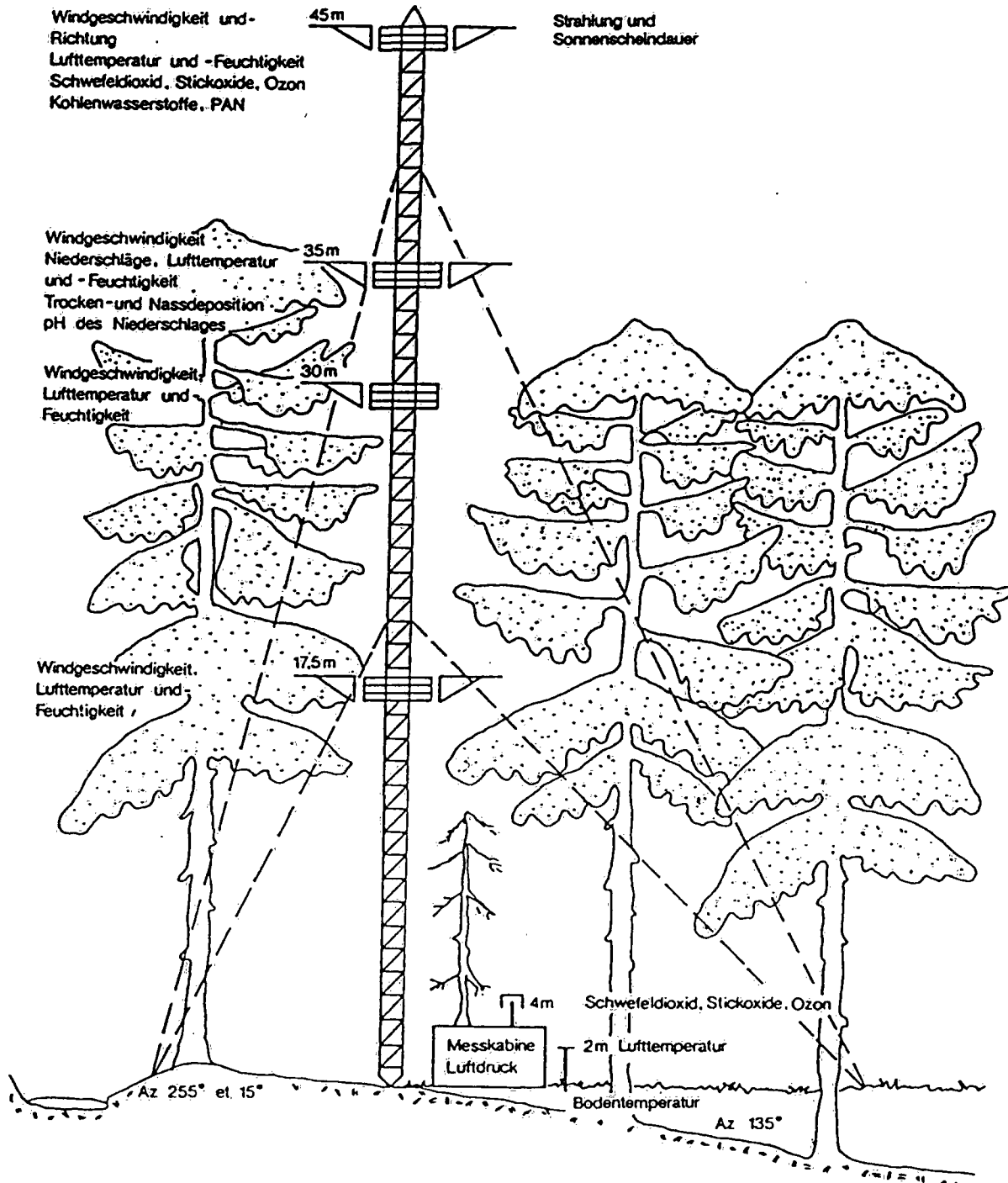
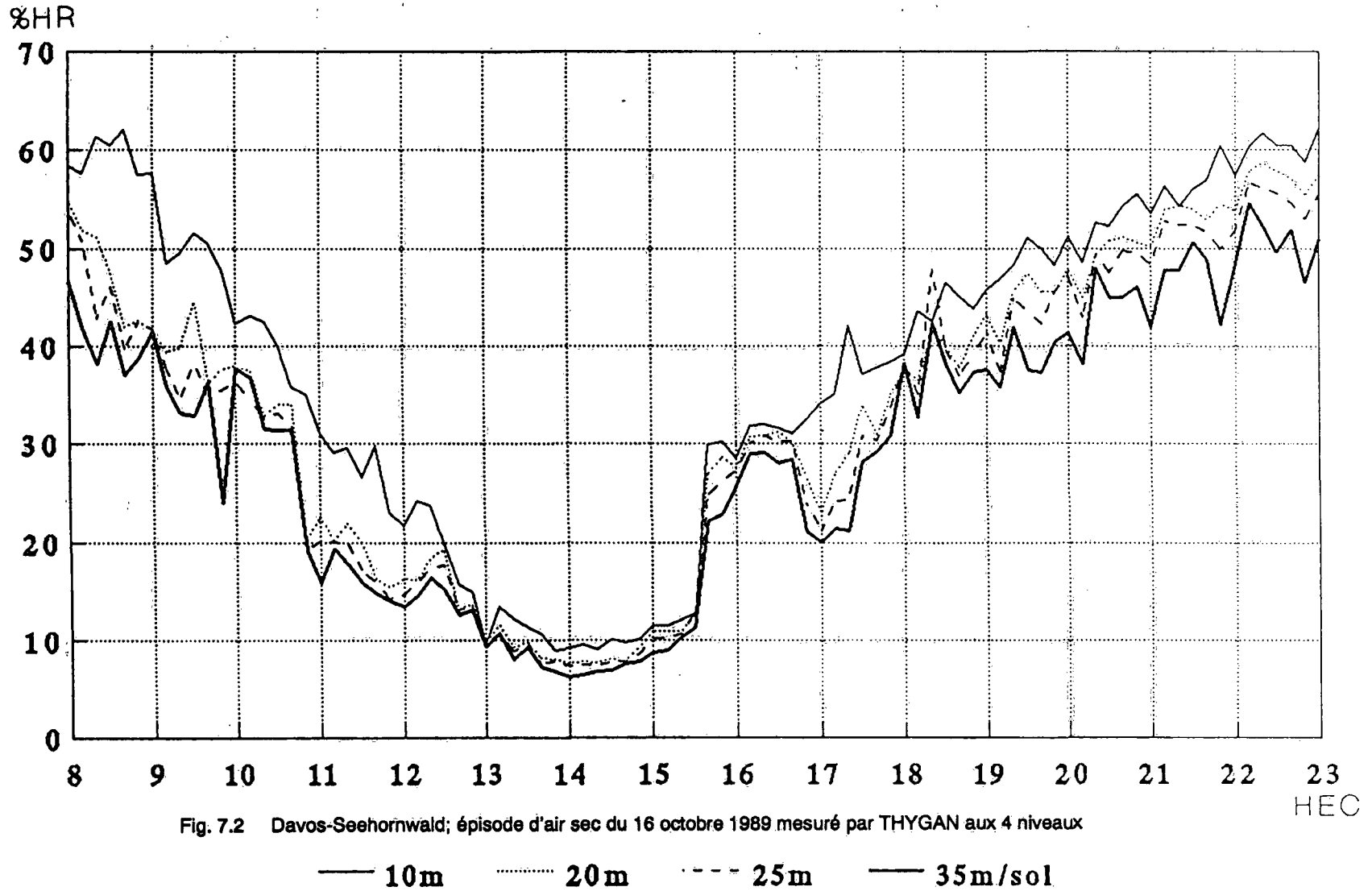


Fig. 7.1 Plan vertical de la station de Lägeren-Zindelen avec son mât principal qui sert de support aux mesures météorologiques, aux prises d'air des mesures des polluants atmosphériques (EMPA), ainsi qu'à certains équipements spéciaux du WSL (tiré du rapport général du PNR 14+). "Lufttemperatur und -Feuchtigkeit" sont mesurés par THYGAN aux 4 niveaux.



8. Schlussfolgerungen und Ausblick

(G. Müller)

8.1 Eigenschaften THYGAN

Das THYGAN lässt sich beschreiben als **geheizte, künstlich belüftete Spezialwetterhütte mit Taupunktspiegel-Feuchtemessung und Thermoelement-Temperaturmessung**.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Instrument lassen folgende Eigenschaften erkennen:

- **Messprinzip:**

Der Taupunktspiegel bildet die Grundlage für eine physikalisch einwandfrei definierte, direkte Methode zur Messung der absoluten Feuchte. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung finden in der gleichen Luftprobe statt. Im Gegensatz zu den bisherigen ANETZ-Fühlern kann aus diesen Gründen auf Korrekturen zur Wahrung der Konsistenz zwischen den Messgrößen verzichtet werden.

- **Technik:**

Als intelligentes Messinstrument mit Selbstüberwachung und Qualitätsinformationen sowie RS 232 -Schnittstelle zur Datenerfassungseinheit entspricht das THYGAN auch zukunftsgerichteten technischen Ansprüchen an einen modernen Sensor.

- **Betrieb:**

Zuverlässige Messungen sind auch unter harten Umwelteinflüssen (Wind, Strahlung, Vereisung, Schnee) möglich; zur Zeit ist das THYGAN über die Landesgrenzen hinaus das einzige Messinstrument, welches auch bei Temperaturen unter Null Grad C im automatischen Routinebetrieb vertrauenswürdige Feuchtemessungen liefern kann. Dadurch ist es im ANETZ an allen Stationen einsetzbar und verbessert die Vergleichbarkeit der Messwerte.

- **Daten:**

Um die Betriebssicherheit sicherzustellen, müssen gerade jene Eigenschaften der Luft durch Heizung beeinflusst werden, welche man messen will. Die Komplexität solcher Mess- und Datenaufbereitungsverfahren kann dem Benutzer die Interpretation der Daten manchmal erschweren.

- **Preis:**

Der hohe Kaufpreis entspricht der Leistung des Gerätes, kann aber einen weiter verbreiteten Einsatz in anderen Ländern erschweren.

8.2 Offene Fragen

Der vorliegende Arbeitsbericht stellt einen ersten Schritt zum Verständnis der THYGAN-Messungen dar. Die national und international verfügbaren Auswertungen belegen die grosse Betriebssicherheit des neuen Instrumentes; über die **Aussagekraft der Messdaten** selbst sind die Erfahrungen hingegen noch vergleichsweise klein. Es existieren zahlreiche statistisch belegte Phänomene, die noch einer deterministischen Erklärung bedürfen. Dazu gehören:

- Kurzzeitige Ausreisser in Messreihen mit grossem Einfluss auf die Extremwerte
- Stationsgebundene Verschiedenartigkeit der Differenzen zwischen den eingesetzten Instrumenten

Über die **Langzeitstabilität** der THYGAN-Messungen ist noch wenig bekannt. Das ventilierte Thermometer VHT stand mehr als zehn Jahre als offizielles Temperaturmessgerät ANETZ im Dienst. Die relativen Fortschritte gegenüber der Hüttenmessung waren unbestritten; erst die Langzeiterfahrung und der Einsatz eines Nachfolgeinstrumentes bieten heute Gelegenheit zu einer besseren absoluten Beurteilung der VHT-Messdaten. Auch beim THYGAN ist mit wachsender Langzeiterfahrung ein ähnlicher Wandel der Beurteilung möglich.

8.3 Ausblick

Zur Klärung der offenen Fragen sind weitere Parallelmessungen im ANETZ und Datenauswertungen unentbehrlich. Das THYGAN wird seit Anfang 1991 als offizielles Temperaturmessgerät ANETZ eingesetzt. Gleichzeitig laufen aber **redundante Messungen** für die Lufttemperatur und -feuchtigkeit weiter:

- An Stationen mit einer Wetterhütte: YSI (Yellow Spring Instruments)-Fühler und Haarhygrometer in Hütte als permanente redundante Fühler
- an Stationen ohne Wetterhütte: YSI-Fühler und Haarhygrometer in Metallstrahlungsschutz als permanente redundante Fühler
- an allen Stationen: bis Ende 1992 befristete Weiterführung der Messungen des ventilierten Thermometers VHT

In Zukunft könnte das THYGAN auch in **neuen Anwendungsgebieten**, z.B. für die Detektion von Nebel oder die Beurteilung von Strahlungs-/Bewölkungsverhältnissen, an Bedeutung gewinnen. Solche Nutzungsmöglichkeiten wären vor allem als Beitrag für einen Ersatz oder eine Ergänzung von Augenbeobachtungen interessant; eine praktische Erprobung fehlt bisher noch.

Aufgrund der guten Resultate im internationalen Hygrometervergleich in Oslo (Kap. 6), besteht die Möglichkeit, dass das THYGAN durch die WMO als **Internationales Referenzhygrometer** für Messungen bei Temperaturen unter Null Grad C homologiert wird. Entsprechende Aktivitäten laufen zur Zeit in der WMO-Fachkommission CIMO (Commission des instruments et des méthodes d'observation).

9. Quellenverzeichnis (R. Dössegger)

- AGr THYGAN (1982): Pflichtenheft "Thermometer / Hygrometer für das ANETZ (THYGAN)"
Internes Dokument SMA vom 6. 4. 1982, unveröffentlicht.
- FNRS (1988): PNR 14+: Dépérissements des forêts et pollution de l'air en Suisse.
Bern, März 1988.
- Gutermann Th. (1986): Das automatische Wetterbeobachtungsnetz der Schweiz (ANETZ).
Tagungsbericht der VDI/VDE-Aussprachetagung "Signalverarbeitung in Multi-Sensor-Systemen" vom 18./19. Februar 1986 in Karlsruhe (BRD).
- Haller G. und Müller G. (1989): Abschlussbericht zum Projekt "Thermometer/Hygrometer ANETZ (THYGAN)".
Interner Bericht SMA / M vom 30.11.89, unveröffentlicht.
- Hoegger B., Joss J., Ruppert P. und Wasserfallen P. (1985): THYGAN A new rugged and microprocessor-based Thermometer and Dew-Point Hygrometer.
TECIMO-III: 8. -12. July 1985 in Ottawa, Kanada.
- Jeannot, P. et al. (1990): PNR14+: Pollution de l'air et météorologie en relation avec les trois parcelles d'expérimentation des forêts.
Schlussbericht SMA/ENV, Juni 1990 Payerne.
- Joss J. (1983): Stand der THYGAN-Erprobung Nr. 3.
Interner Bericht SMA vom 24. 1.83, unveröffentlicht.
- Joss J. und Gutermann Th. (1981): Grundlagen der Feuchtemessung.
Wiss. Kolloq. SMA/ F vom 30. 6.81.
Interne Vervielfältigung SMA, Zürich.
- Joss J. und Gutermann Th. (1982-84): Der neue kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler THYGAN.
Wiss. Kolloq. SMA/F vom 9. 6.1982, 22. 6.83, 2.11.83 und 28. 3.84.
Interne Vervielfältigungen SMA, Zürich.
- Liljequist G.H. und Cihak K. (1984): Allgemeine Meteorologie, 3. Auflage.
Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- Mayer F. (1988): Vergleich des THYGAN mit dem ventilierten Thermometer und dem Haarhygrometer des ANETZ:
Interner Bericht SMA / DAT, Zürich.
- Müller G. (1982): Handbuch für Beobachter des automatischen Beobachtungsnetzes. Nachführung 1986.
SMA, Zürich.
- Müller G. (1984): Vergleich der Temperaturen verschiedener Wetterhütten an einigen Stationen des ANETZes.
Arbeitsber. SMA No. 119, Zürich.
- Ruppert P. (1991): THYGAN: Beschreibung der Funktion und der Technik.
Arbeitsber. SMA No. 164, Zürich.
- SMA (1985), div. Autoren: Charakteristiken der ANETZ-Daten (Beiträge zum ANETZ-DATEN KOLLOQUIUM vom 17. April 1985 in Zürich).
Vervielfältigung SMA, Zürich.
- SMA (1989): CHARAN-Doc: Sammlung der Arbeitspapiere der Arbeitsgruppe "Charakteristiken der ANETZ-Daten".
Unpublizierte Dokumentation SMA / DAT, Zürich.

- SMA und BLW (1980), div. Autoren: Projekt ANETZ 1974 - 1980: Automatisches Meteorologisches Mess- und Beobachtungsnetz (Zusammenfassung der Vorträge der ANETZ-Kolloquien vom 26. und 27. November 1980 in Zürich).
Vervielfältigung SMA, Zürich.
- Skaar J., Hegg K., Moe T. und Smedstud K. (1989): WMO International Hygrometer Intercomparison: Instruments and observing methods, Report No. 38.
WMO/TD-No.316. 1989 -, Geneva.
- Wasserfallen P. (1983): Tests en enceinte climatique, premiers résultats.
Wiss. Kolloq. SMA/ F vom 22.06.83.
Interne Vervielfältigung SMA, Zürich.
- Wasserfallen P. (1983- 85): Comparaisons THYGAN sur le terrain d'essais. Comptes rendus des mesures.
Interne Berichte SMA/ SPA: 1983, 1984, 1985 und 1986; Payerne.
- Wasserfallen P. (1986 a): THYGAN-forêts; Premiers résultats des mesures.
Interner Bericht SMA / SPA, Payerne.
- Wasserfallen P. (1986 b): THYGAN-Davosersee; note d'information.
Interner Bericht SMA / SPA, Payerne.
- Wasserfallen P. (1987): THYGAN-forêts; Performances des mesures, période mars 1986 - janvier 1987.
Interner Bericht SMA / SPA, Payerne.
- Wasserfallen P. (1990): Thermomètre THYGAN: comparaisons et tests supplémentaires.
Interne Berichte SMA / ENV, Payerne.
- Wasserfallen P. und Viatte P. (1981): Etude expérimentale d'un hygromètre à cheveux Lamprecht type 800L100.
Arbeitsber. SMA No. 104, Payerne.
- WMO (1985): CIMO IX, Commission for Instruments and Methods of Observation, Final Report.
WMO-No. 651, 1985, Geneva.

