

Bestimmung der Variabilität der Mesopausentemperatur
aus OH*-Emissionen

Diplomarbeit

von

Hans-Helmut Graef

BERGISCHE UNIVERSITÄT - GESAMTHOCHSCHULE WUPPERTAL

FACHBEREICH 8 - PHYSIK

Juni 1991

WU D-91-23

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Grundlage des Meßverfahrens</u>	3
2.1 Prinzip der Temperaturbestimmung	3
2.2 Höhenprofil der Dichteverteilung der OH [*] -Moleküle	8
2.3 Störeffekte	12
2.4 Abschätzung des Temperaturfehlers	15
<u>3. Meßsystem</u>	16
3.1 Beschreibung der Spektrometer	16
3.2 Rechnergesteuerte Meßwerterfassung	21
3.3 Auswirkung hochenergetischer Teilchen auf das Detektorsignal	24
3.4 Eichungen	25
3.5 Bestimmung der Emissionsspektren verschiedener Gasentladungslampen	30
3.6 Interkalibrierung der Spektrometer	32
3.7 Vergleich der OH [*] -Rotationstemperaturen mit anderen Temperatur-Meßverfahren	35
<u>4. Meßergebnisse</u>	40
4.1 Langzeitvariation der OH [*] -Rotationstemperaturen	45
4.2 Jährliche Änderung der Wellenaktivität	54
4.3 Vergleich der OH [*] -Temperaturverläufe in Biscarosse und Wuppertal	60
4.4 DYANA: Vergleich der Temperaturosillationen an drei europäischen Meßstationen (Spanien/Frankreich/Norwegen)	64
<u>5. Zusammenfassung</u>	69
<u>6. Literatur</u>	70
<u>7. Anhang</u>	75

Abbildungen

Abb. 1: Temperaturabhängiger Intensitätsverlauf der OH* (3,1)-P ₁ (2), -P ₁ (3), P ₁ (4)-Linienemissionen	6
Abb. 2: Dichte-Profil der an Reaktion (2.1) beteiligten Spurengase O ₃ , H	8
Abb. 3: Abhängigkeit der OH*-Peakhöhe von der geographischen Breite und vom Zeitpunkt der Messungen (Jahresgang)	9
Abb. 4: Höhenprofil der Dichteverteilung angeregter OH-Moleküle für verschiedene Vibrationsniveaus	10
Abb. 5: Skizzen der Spektrometeraufbauten	18
Abb. 6: Informationsfluß-Skizzen der Spektrometer	21
Abb. 7: Detektorsignal bei einem Spike-Ereignis	25
Abb. 8: Spektrometer I: Wellenlängeneichung	27
Abb. 9: Spektrometer II: Wellenlängeneichung	28
Abb. 10: Spektrometer I: Schwarzkörperspektrum	29
Abb. 11: Spektrometer I: Hg-Eichspektrum einer Osram Hg/10-Spektrallampe	31
Abb. 12: Spektrometer I: Cd-Eichspektrum einer Osram Cd/10-Spektrallampe	31
Abb. 13: Temperaturresiduen der Temperaturmittelwerte	33
Abb. 14: Temperaturresiduen für gute bis sehr gute Meßbedingungen	34
Abb. 15: Temperaturprofil einer Falling-Sphere-Messung	37
Abb. 16: Temperaturresiduum von OH*- und OH*-äquivalenten LIDAR-Temperaturen	38
Abb. 17: Temperaturresiduum von OH*- und OH*-äquivalenten Falling-Sphere-Temperaturen	38
Abb. 18: OH*-Temperaturmessungen in Wuppertal	40
Abb. 19: Darstellung aller seit 1980 mit den Spektrometern I und II bestimmten Temperaturnachtmittelwerte	43
Abb. 20: Variation der OH*-Temperatur (Monatsmittel)	46
Abb. 21: Trendanalyse der Monate Januar / Dezember	48
Abb. 22: Vergleich der von der CIRA89-Modellatmosphäre (86 km Höhe) angegebenen Temperaturmonatsmittel mit den Monatsmittelwerten der OH*-Temperaturen	51
Abb. 23: Temperaturabweichungen zwischen Monatsmittelwerten der OH*-Temperaturen und der CIRA89-Modelltemperatur	52

Abb. 24: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983	58
Abb. 25: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983, Mai 1987-Dezember 1989 und April 1990-Februar 1991	59
Abb. 26: Temperaturverläufe im Vergleich mit der CIRA89-Modellatmosphäre in 86 km Höhe	61
Abb. 27: Verlauf der Monatsmittel im Vergleich mit der CIRA89-Modellatmosphäre in 86 km Höhe	62
Abb. 28: Temperaturdifferenzen zwischen Wuppertal und Biscarosse	63
Abb. 29: Temperaturverläufe in Andoya, Biscarosse und El Arenosillo	65
Abb. 30: Vergleich der FFT-Analysen für verschiedene Meßorte	67

Tabellen

Tab. 1: Quantenmechanische Größen der OH* ($X^2 \Pi$)-Übergänge Übergänge von Vibrationsniveau $v'=3$ nach $v''=1$	7
Tab. 2: Leistungsdaten der OH*-Spektrometer	20
Tab. 3: Temperaturzunahme im Bereich der OH*-Schicht	50
Tab. 4: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariation beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983	56
Tab. 5: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983, Mai 1987-Dezember 1989 und April 1990-Februar 1991	56

1. Einleitung

Bei der Erforschung physikalischer und chemischer Prozesse in der Erdatmosphäre spielen bodengebundene Meßsysteme wie z.B. LIDAR-Meßsysteme (Light Detection and Ranging) und OH*-Spektrometer eine wesentliche Rolle. Diese Systeme ermöglichen langfristige kontinuierliche Messungen atmosphärischer Parameter zu verhältnismäßig niedrigen Kosten.

Speziell bei der Untersuchung der Dynamik und der Chemie der Mesopause, die als Bindeglied zwischen Mesosphäre und Thermosphäre einen wichtigen Bereich der Erdatmosphäre darstellt, können bodengebundene, kontinuierliche Messungen wichtige Beiträge zum Verständnis dieser Region liefern. Die Mesopause wird mit dem Minimum des Temperaturprofils zwischen Mesosphäre und Thermosphäre identifiziert. Die Höhe der Mesopause liegt typischerweise im Bereich von 80-100 km (Neuber et al., 1988). Ihre Lage ist im wesentlichen von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängig.

Bodengebundene Messungen der Atmosphärentemperatur im Höhenbereich der Mesopause basieren im wesentlichen auf folgenden vier Emissionen, die im Wellenlängenbereich von sichtbarer bis infraroter Strahlung beobachtet werden :

- Vibrations-Rotationsbanden des OH($X^2 \Pi$)
(z.B. Gerndt, 1986)
- Emissionen des atomaren und molekularen Sauerstoffs
(z.B. Scheer und Reisin, 1989)
- Emissionen metallischer Atome wie Natrium, Magnesium
(z.B. Neuber et al., 1988)
- an Atmosphärenmolekülen gestreute monochromatische Laserstrahlung (z.B. Chanin und Hauchecorne, 1984)

Seit der Identifizierung der intensiven nächtlichen Infrarot (IR)-Emissionen als Rotations-Vibrationsbanden des angeregten OH - Moleküls (OH*) durch Meinel (1950) wurden verschiedene theoretische und experimentelle Arbeiten zum Verhalten des OH*-Moleküls veröffentlicht. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten konzentriert sich auf die Bestimmung der Höhenverteilung der OH*-Moleküle (z.B. Baker und Stair, 1988; Lopez-Moreno et al., 1987), auf die Chemie der an der Erzeugung angeregter OH-Moleküle beteiligten Spurengase (z.B. Texier et al., 1987) und auf die Bestimmung der kinetischen Temperatur (z.B. Gerndt, 1986) im Bereich der OH*-Schicht.

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Variabilität der OH*-Rotationstemperatur. Diese Temperatur entspricht für Rotationsübergänge unter LTG-Bedingungen (lokales thermodynamisches Gleichgewicht) der kinetischen Temperatur, also der Temperatur der Atmosphäre im Bereich der Mesopause.

Die Temperatur ist eine charakteristische atmosphärische Kenngröße, die Rückschlüsse auf dynamische Vorgänge ermöglicht. Aus diesem Grunde können die hier vorgestellten Messungen zur Ableitung dynamischer Prozesse im Bereich der Mesopause benutzt werden.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Meßsystemen ist es möglich, Temperaturvariationen direkt während der Messung zu beobachten. Diese direkt zugängliche Temperaturinformation wird z.B. zur Ermittlung bestimmter Meßbedingungen für andere im Höhenbereich der Mesopause arbeitende Meßsysteme benutzt.

Auch unter diesem Gesichtspunkt wurden die beiden Wuppertaler Spektrometer im Zeitraum von Januar bis März 1990 während der DYANA-Kampagne (DYnamic Adapted Network for the Atmosphere) in Andoya (69°N, 16°O), Norwegen, und in Biscarosse (44°N, 1°W), Frankreich, eingesetzt.

Bei der DYANA-Kampagne handelt es sich um ein internationales Forschungsprojekt zur Untersuchung dynamischer Vorgänge der mittleren Atmosphäre (10-100 km Höhe). Zu diesem Zweck wurde ein Meßnetz von über die Erde verteilten, koordinierten bodengebundenen, ballon- und raketentragenen Experimenten aufgebaut. Die Orte der Kampagnenstationen wurden so ausgewählt, daß sich ein Netz mit variabler, an die horizontale Struktur der dynamischen Vorgänge angepaßter Maschenweite ergibt. Die Schwerpunkte dieser Untersuchungen bilden dabei planetare Wellen, Schwerewellen, Turbulenzen und die Auswirkungen dieser dynamischen Vorgänge auf die Spurengasverteilung der Atmosphäre (Offermann, 1988).

Da an den Kampagnenstationen eine Vielzahl unterschiedlicher Meßsysteme eingesetzt wurden, ist ein Vergleich der mit unterschiedlichen Meßtechniken in überlappenden Höhenbereichen gewonnenen Resultate möglich.

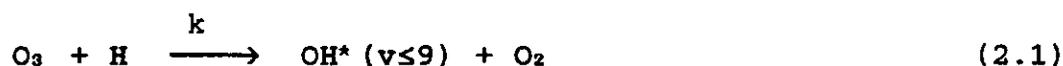
Vergleiche von LIDAR- und Falling-Sphere-Temperaturmessungen mit den entsprechenden OH*-Rotationstemperaturen stellen einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

2. Grundlage des Meßverfahrens

2.1 Prinzip der Temperaturbestimmung

Das in dieser Arbeit benutzte Meßverfahren beruht auf der Beobachtung nächtlicher Infrarot-Emissionen, des sogenannten Airglow. Ein Spektrum dieses Airglows ist beispielhaft im Anhang dargestellt (Abb A1). Ursache der untersuchten Emissionen sind Strahlungsübergänge im Bereich der $\text{OH}(X^2 \pi)$ -Vibrations-Rotationsbanden (Meinel, 1950). Die Grundlagen für die Temperaturbestimmung im Bereich der Mesopause durch vom Erdboden aus gemessene Emissionen des OH^* -Moleküls werden in den Arbeiten von Meinel (1950), Krassovsky et al. (1962), Mies (1974) und Texier et al. (1987) beschrieben.

Der hauptsächliche Produktionsmechanismus für angeregtes OH des $\text{OH}(X^2 \pi)$ -Bandensystems im Höhenbereich der Mesopause wird durch folgende exotherme Reaktion beschrieben :

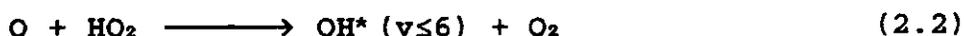


mit : $k \equiv$ Reaktionskonstante
 $= 1.4 \cdot 10^{-10} \cdot \exp(-470/T) \text{ [cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$

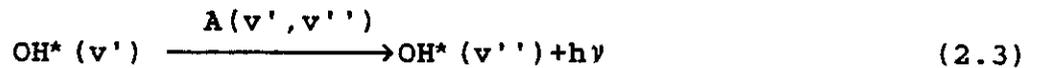
(DeMore et al., 1990)

Bei dieser Reaktion wird eine Energie von ca. 77 kcal/mol frei. Dieser Energiebetrag ist ausreichend, OH-Moleküle im elektronischen Grundzustand in Vibrationsniveaus ($7 \leq v \leq 9$) anzuregen (Texier et al., 1987).

In der Vergangenheit wurde fälschlicherweise davon ausgegangen, daß auch die "Perhydroxyl"-Reaktion OH^* in niedrigen Vibrations-Rotationsniveaus erzeugt (Llewellyn et al., 1978):

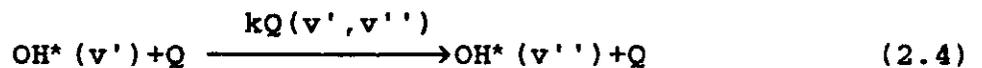


Neuere Veröffentlichungen belegen, daß dieser Produktionsmechanismus ausgeschlossen werden kann (Kaye, 1988), so daß davon auszugehen ist, daß niedrigere Niveaus, d.h. Niveaus mit $v \leq 7$, im wesentlichen durch eine Kaskade von Strahlungsübergängen besetzt werden:



mit : $A(v',v'') \equiv$ Einstein-übergangskoeffizienten
(Mies, 1974)

Neuere Untersuchungen beschreiben Mechanismen der Deaktivierung des OH^* -Moleküls durch Stöße mit N_2 - und O_2 -Molekülen, die das Höhenprofil der OH^* -Moleküle mitbestimmen:



(McDade; Llewellyn, 1987)

Die intensivsten Übergänge des OH^* -Bandensystems sind Übergänge mit $\Delta v=2$ (Battner und Lopez-Moreno, 1979). Daher erfolgt die in dieser Arbeit beschriebene Bestimmung der Rotationstemperatur aus Messungen der Linienintensitäten im Bereich der $\text{OH}^*(3,1)$ -Vibrations-Rotationsbande, d.h. aus Übergängen zwischen $v'=3$ und $v''=1$. Die diesen Emissionen entsprechende Infrarot-Strahlung liegt im Wellenlängenbereich von 1.52 - 1.55 μm .

Um mit diesen Emissionen Atmosphärentemperaturen im Bereich der OH^* -Schicht aus Bodenmessungen ermitteln zu können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein :

- (a) Die Besetzungszahlen der entsprechenden Rotationsniveaus beschreiben eine Boltzmannverteilung, d.h. die Rotationsübergänge sind thermalisiert (LTG-Bedingungen),
- (b) atmosphärische Absorptionen unterhalb der OH^* -Schicht haben keinen Einfluß auf die Temperaturbestimmung.

Bedingung (a) ist in 90 km Höhe durch Stoßrelaxation des OH* mit der umgebenden Atmosphäre für Lebensdauern $\tau \geq 2.4$ ms gewährleistet (Lange, 1982). Unter Benutzung der Einsteinkoeffizienten von Mies (1974) ergibt sich für Übergänge von OH* (v=9) nach OH* (v=3) eine Lebensdauer von 24 ms (Baker, 1978). Bei den beobachteten Übergängen kann somit von lokalem thermodynamischen Gleichgewicht (LTG) ausgegangen werden.

Zu Punkt (b) ist zu sagen, daß die Transmission der Atmosphäre im beobachteten Spektralbereich bei 1.55 μm größer als 99.9 % ist (Lange, 1982). Dies bedeutet, daß unterhalb der beobachteten OH*-Schicht keine Linienabsorption durch CO₂ oder H₂O vorkommen sollte. Die ebenfalls auftretende Kontinuumsabsorption und Streuung durch Aerosole sollte, da sie im Spektralbereich um 1.55 μm einen flachen spektralen Verlauf aufweist (Harrison und Kendall, 1973; Lange, 1982), keinen verfälschenden Einfluß auf unsere Temperaturableitung haben.

Die Ableitung der Rotationstemperatur des OH*-Moleküls aus Emissionsmessungen beruht auf folgendem Zusammenhang von Intensität der Emission und Rotationstemperatur des OH*-Moleküls:

$$I(v', J', i' \rightarrow v'', J'', i') = N_{v'} \cdot A(v', J', i' \rightarrow v'', J'', i') \cdot \frac{2(2J'+1)}{Q_{v'}(T_{rot})} \cdot \exp\left(\frac{-F(J')_{i', v'}}{k \cdot T_{rot}}\right) \quad (2.5)$$

mit: I(...)	≡ Intensität des durch v, J, i definierten Übergangs [Photonen · sec ⁻¹ · cm ⁻³]
N _{v'}	≡ Zahl der Moleküle im Zustand v' [cm ⁻³]
A(...)	≡ Einsteinkoeffizienten für spontane Emission [sec ⁻¹]
i	≡ Kennzeichnung des Dublettzweiges
v	≡ Bezeichnung des Vibrationsniveaus
J	≡ Drehimpulsquantenzahl
Q _{v'} (T _{rot})	≡ Rotationszustandssumme
F _{i, v'} (J')	≡ Rotationsenergie, Energiedifferenz zum entsprechenden Vibrationsniveau [cm ⁻¹]
k	≡ Boltzmannkonstante = 0.6948 cm ⁻¹ · K ⁻¹
T _{rot}	≡ Rotationstemperatur, für LTG-Bedingungen entspricht T _{rot} der kinetischen Temperatur der Atmosphäre [K]

Die Berechnung der Intensität aus der Rotationstemperatur bzw. der Rotationstemperatur aus gemessenen Intensitäten mit Formel (2.5) ist für nach Boltzmann verteilte Besetzungszahlen der betrachteten Vibrations-Rotations-Übergänge möglich (Gerndt, 1986; Sivjee, Hamwey, 1987).

Die auf Formel (2.5) begründete Temperaturableitung erfolgt aus Messungen der Intensitäten dreier Linienemissionen des P-Zweiges der OH* (3,1)-Bande.

Die Auswahl der $P_1(2)$, $P_1(3)$, $P_1(4)$ -Linienemissionen erfolgt aufgrund des in Abbildung 1 dargestellten Intensitätsverlaufs in Abhängigkeit von der Rotationstemperatur und der unter Punkt (a) und (b) erläuterten Voraussetzungen. Diese Voraussetzungen sind für Linienemissionen der OH* (3,1)-Bande erfüllt (Lange, 1982).

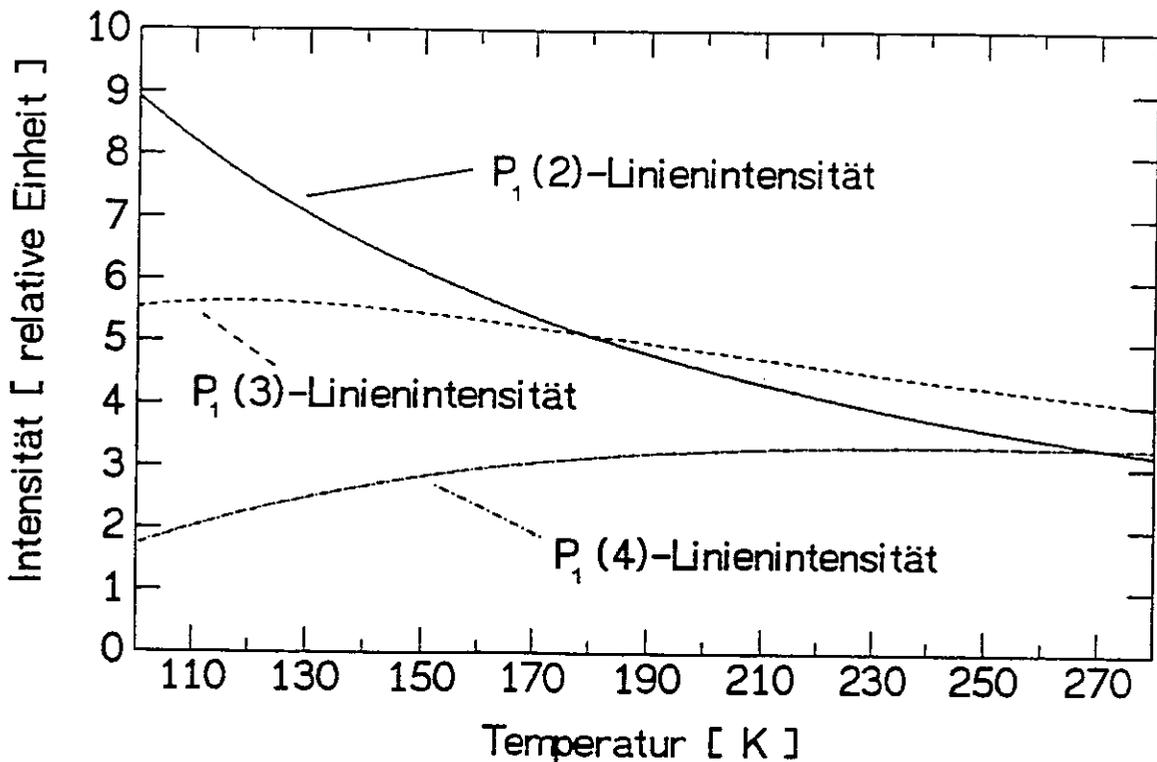


Abb. 1: Temperaturabhängiger Intensitätsverlauf der OH* (3,1)- $P_1(2)$, - $P_1(3)$, - $P_1(4)$ -Linienemissionen.

Die Größen N_v' und Q_v' (T_{rot}) sind aus Intensitätsmessungen vom Boden aus nicht bestimmbar. Deshalb wird die Rotationstemperatur unabhängig von diesen Größen aus den Intensitätsverhältnissen der drei oben genannten Linienemissionen ermittelt. Hierzu wird Formel (2.5) folgendermaßen umgestellt:

$$\ln\left(\frac{I_{gem}}{2(2J'+1) \cdot A(..)}\right) = \text{Konst.} - \frac{F(J')}{k \cdot T_{rot}} \quad (2.6)$$

mit: I_{gem} \equiv gemessene Linienintensität [rel. Einheit]
 Konst. $\equiv \ln(Q_{v'}(T_{rot})/N_{v'})$, für Übergänge einer Vibrationsbande, d.h. für ein v' ist dieser Ausdruck konstant.

Setzt man nun nach Formel (2.6) die gemessenen Intensitäten mit den entsprechenden Rotationsenergien in Bezug, so ist die Rotationstemperatur direkt aus der Steigung der mittels linearer Regression aus diesen Wertepaaren bestimmten Geraden zu berechnen (Gerndt, 1986; Sivjee und Hamwey, 1987).

Den Berechnungen liegen die in Tabelle 1 aufgeführten Größen zugrunde.

Tab. 1: Quantenmechanische Größen der $\text{OH}^*(X^2 \pi)$ -Übergänge
 Übergänge von Vibrationsniveau $v'=3$ nach $v''=1$

	J'	$F_{1,3}(J')$ [cm^{-1}]	$F_{1,1}(J'')$ [cm^{-1}]	Wellenlänge [μm]	$A(..)$ [sec^{-1}]
$P_1(2)$	3/2	-42.0	41.2	1.524	16.742
$P_1(3)$	5/2	32.9	155.2	1.533	20.367
$P_1(4)$	7/2	138.4	303.3	1.543	21.823

Die Angabe der Rotationsenergien und die Wellenlängen der P-Übergänge erfolgt nach Krassovsky et al. (1962), die Einsteinkoeffizienten sind der Arbeit von Mies (1974) entnommen.

Eine detaillierte Darstellung des $\text{OH}(X^2 \pi)$ -Vibrations-Rotations-Spektrums wird von Gerndt (1986) gegeben.

2.2 Höhenprofil der Dichteverteilung der OH*-Moleküle

Die Messungen der OH*-Linienemissionen mit dem in dieser Arbeit benutzten bodengebundenen Meßsystem liefert keine Information über die Höhe der emittierenden Moleküle.

Höhe und Form der OH*-Schicht sind jedoch für die Auswertung der OH*-Temperaturdaten, z.B. für den Vergleich verschiedener Meßsysteme, von zentraler Bedeutung. Das in dieser Arbeit verwendete Höhenprofil wird aus verschiedenen theoretischen und experimentellen Arbeiten zu diesem Thema abgeleitet.

Berechnungen, die zunächst nur die Höhenverteilung der an der Erzeugungsreaktion (2.1) beteiligten Spurengase O₃ und H berücksichtigen (siehe Abb. 2), liefern eine erste Abschätzung der Lage des OH*-Dichtemaximums (Peakhöhe) im Höhenbereich von 85-90 km (Texier et al., 1987).

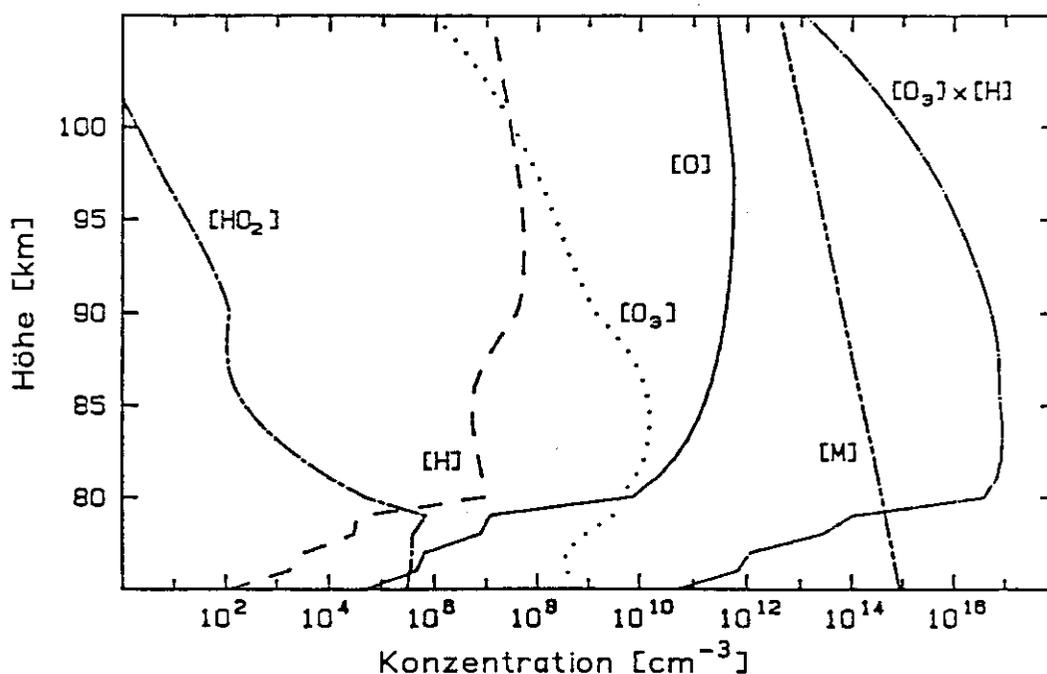


Abb. 2: Dichte-Profil der an Reaktion (2.1) beteiligten Spurengase O₃, H (Rodrigo et al., 1986).

Auswertungen von raketengeträgten In-Situ-Messungen der Volumenemissionsraten des OH*-Moleküls liefern ein mittleres Höhenprofil der OH*-Schicht. Bei der Bestimmung dieses Höhenprofils aus 17 ausgewählten Photo- und Radiometermessungen erhält man als Peakhöhe der OH*-Schicht 86.8 ± 2.6 km und als Halbwertsbreite der Schicht 8.6 ± 3.1 km. Die Berechnung dieser Mittelwerte erfolgt ohne Differenzierung der Daten nach unterschiedlichen geographischen Breiten der Meßorte und nach in unterschiedlichen Vibrationsbanden gemessenen Emissionen des OH*-Moleküls (Baker und Stair, 1988).

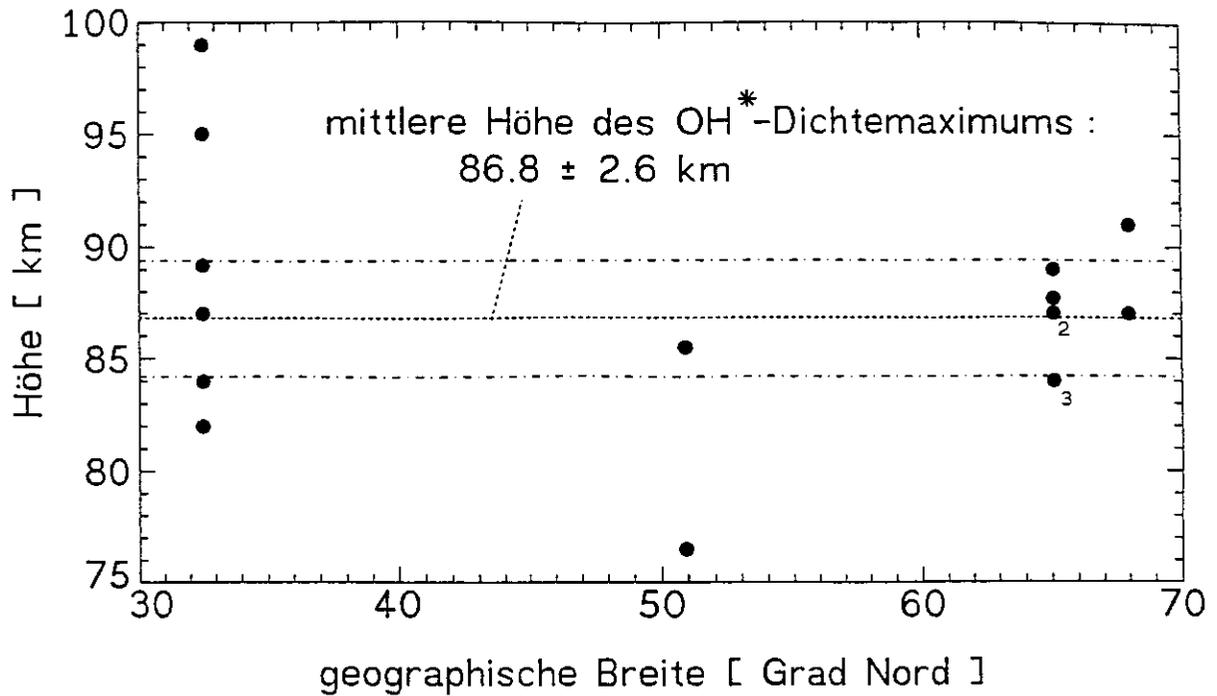


Abb. 3a: OH*-Peakhöhe der 17 ausgewählten Messungen in Abhängigkeit von der geographischen Breite. Die mit den Zahlen 2 und 3 gekennzeichneten Punkte stehen für 2 bzw. 3 identische Meßwerte (Baker und Stair, 1988).

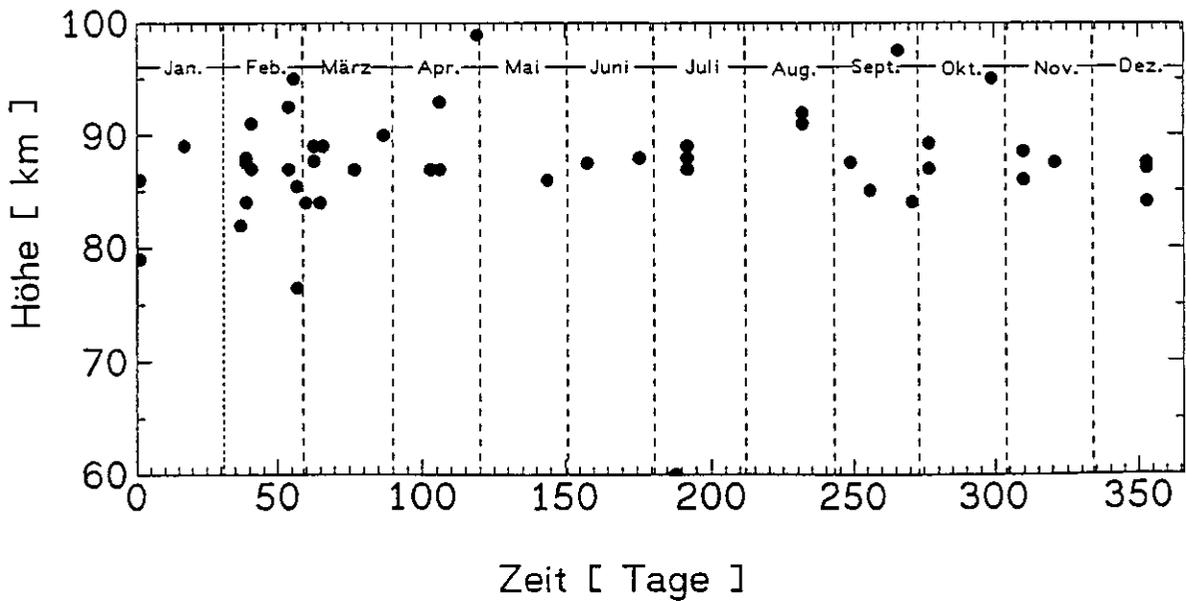


Abb 3b: Jahresgang der OH*-Peakhöhe bei Berücksichtigung aller 52 aufgeführten Peakhöhen (Baker und Stair, 1988).

Anhand der Auswertungen von Baker und Stair (1988) kann für die mittlere Höhe des OH*-Dichtemaximums weder eine Abhängigkeit von der geographischen Breite (vgl. Abb. 3a) noch ein Jahresgang (vgl. Abb. 3b) abgeleitet werden. In der gleichen Arbeit wird für niedrigere Vibrationsniveaus eine gegenüber höheren Niveaus um etwa 2 km geringere Peakhöhe beschrieben.

Die Ableitung von nach verschiedenen Vibrationsbanden differenzierten OH*-Höhenprofilen aus Messungen von OH*-Emissionen unterschiedlicher Wellenlängen in Verbindung mit photochemischen Modellrechnungen liefert eine mittlere Peakhöhe von 87 km. Besonders auffällig ist dabei die starke Höhenabhängigkeit der Konzentrationsmaxima vom jeweiligen Vibrationsniveau (siehe Abb. 4). Die Konzentrationsmaxima der niedrigen Vibrationsniveaus $v=2$ und $v=3$ scheinen um ca. 5 km tiefer zu liegen als die maximalen Konzentrationen der höheren Vibrationsniveaus $v \geq 5$ (Lopez-Moreno et al., 1987).

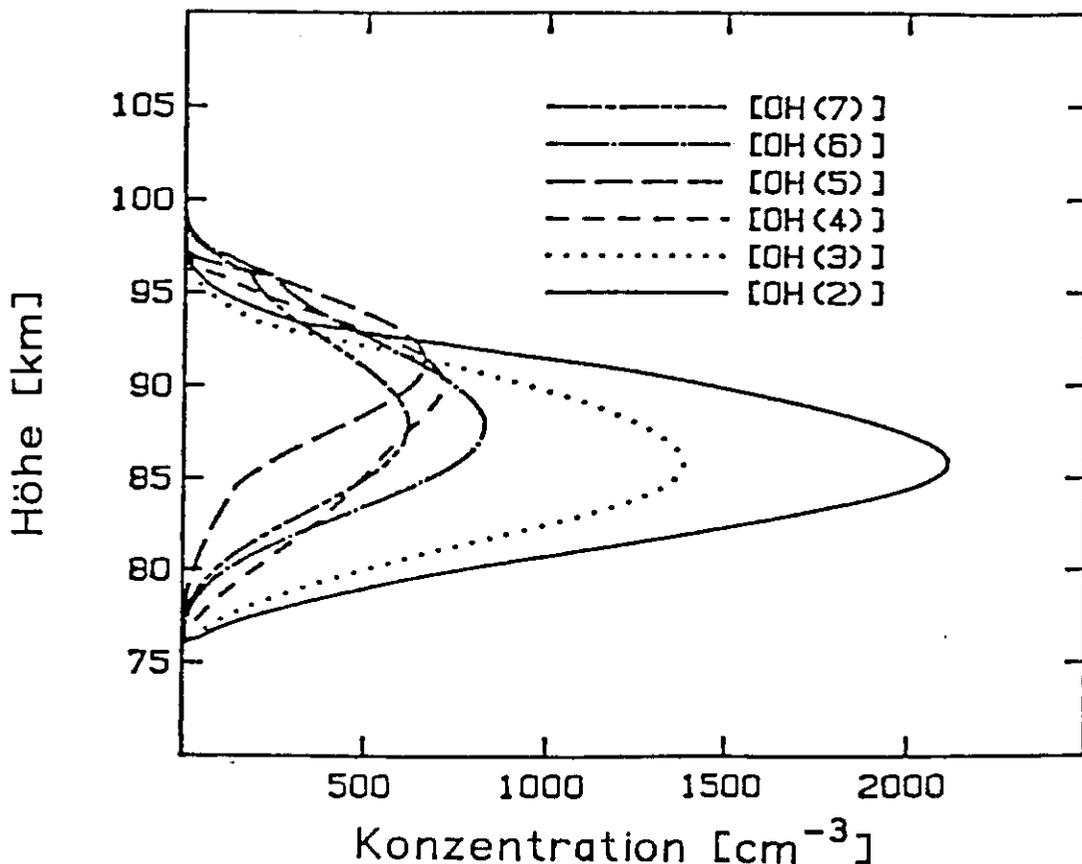


Abb. 4: Höhenprofil der Dichteverteilung angeregter OH-Moleküle für verschiedene Vibrationsniveaus (Lopez-Moreno et al., 1987).

Eine indirekte Möglichkeit zur Bestimmung der OH*-Schichthöhe besteht im Vergleich von Na-LIDAR-Temperaturprofilen mit den aus bodengebundenen Spektrometermessungen abgeleiteten OH*-Temperaturen. Diese in Andoya (69°N/16°O) durchgeführte Höhenbestimmung ergibt eine mittlere Schichthöhe von 86 ± 4 km und eine Schichtdicke von 8 km. Der zur Höhenbestimmung durchgeführte Temperaturvergleich deutet für die beobachtete OH* (3,1)-Vibrations-Rotations-Bande darauf hin, daß das Schichtmaximum geringfügig niedriger als 86 km liegt (von Zahn et al., 1987).

Bei der Beschreibung der OH*-Schicht für den in dieser Arbeit beschriebenen Übergang von $v'=3$ nach $v''=1$ wird deshalb von einer gaussförmigen Dichteverteilung mit einer Peakhöhe von 86 km und einer Halbwertsbreite von 4 km ausgegangen.

Bei Vergleichen der aus bodengestützten Emissionsmessungen abgeleiteten OH*-Temperatur, d.h. der Atmosphärentemperatur im Höhenbereich von ca. 86 km, mit anderen Meßsystemen ist zu berücksichtigen, daß die gemessenen Emissionen eine über die OH*-Schicht integrierte Gesamtintensität widerspiegeln:

$$I_{gem}(v', J', i' \rightarrow v'', J'', i') = 2(2J'+1) \cdot A(..) \cdot \int_{75 \text{ km}}^{95 \text{ km}} dz \frac{N_{v'}(z)}{Q_{v'}(T_{rot}(z))} \cdot \exp\left(\frac{-F(J')_{i', v'}}{k \cdot T_{rot}(z)}\right) \quad (2.7)$$

mit: $I_{gem}(..)$ \equiv gemessene OH* (3,1)-Linienintensität [rel. Einheit]
 z \equiv Höhe [km]
 $N_{v'}(z)$ \equiv höhenabhängige Dichteverteilung der OH*-Schicht [cm^{-3}]
 $N_{v'}(z) = \text{konst.} \cdot \exp[-(86-z)^2/4.8^2]$
 (Gerndt, 1986)
 $T_{rot}(z)$ \equiv Temperaturprofil der Atmosphäre [K]

Da im Bereich der Mesopause im allgemeinen ein geringer Temperaturgradient vorliegt (< 10 K/km), sind die Unterschiede zwischen lokaler und über die OH*-Schicht gemittelter Temperatur jedoch klein.

Modellrechnungen, denen Formel (2.7) zu Grunde liegt und die auch den Extremfall eines überadiabatischen Temperaturgradienten von 10 K/km im Bereich der OH*-Schicht berücksichtigen, ergeben maximal 3.5 K Abweichung der OH*-Rotationstemperatur von der Atmosphärentemperatur in 86 km Höhe (Lange, 1982).

2.3 Störeffekte

Atmosphärenmessungen mit bodengestützten Meßsystemen unterliegen wegen der langen Wege der zu untersuchenden Emissionen durch die Atmosphäre immer störenden Einflüssen, die u.U. zu systematischen Meßfehlern führen. Zusätzliche Emissionen fremder Moleküle bzw. Linienabsorptionen der betrachteten Emissionen unterhalb der untersuchten Höhenschicht können die Meßergebnisse verfälschen.

Wie bereits unter 2.1 erläutert, ist die Atmosphäre im untersuchten Spektralbereich zu 99.9 % transparent, es ist somit nicht mit Linienabsorptionen zu rechnen. Ebenso sollte die Kontinuumsabsorption durch Aerosole zunächst keinen störenden Einfluß auf die Temperaturableitung haben.

Bei den OH*-Messungen treten vier wesentliche Störeffekte auf:

Modellrechnungen zeigen, daß der Wellenlängenbereich des $P_1(4)$ -Übergangs durch zusätzliche Emissionen des R-Zweiges der OH*(4,2)-Vibrations-Rotationsbande beeinflusst ist.

Diese temperaturabhängige Kontamination wird mit einem konvergierenden Iterationsverfahren bestimmt und von der gemessenen $P_1(4)$ -Intensität subtrahiert (Lange, 1982).

Durch Bewölkungsänderungen innerhalb der Meßzeit für ein Spektrum (2-5 Min.) können die Intensitäten der drei zu vermessenden Linien unterschiedlich stark beeinflusst werden. Eine Verwendung dieser Spektren würde zu Fehlern in der Temperaturbestimmung führen. Deshalb werden diese offensichtlich gestörten Spektren nach den Messungen anhand von Schreiberaufzeichnungen identifiziert, aussortiert und gehen damit nicht in die Temperaturableitung ein.

Bei den Serienmessungen in Wuppertal treten Störungen der gemessenen Intensitäten auf, die durch an Aerosolen in das Gesichtsfeld der Spektrometer gestreute Stadtbeleuchtung verursacht werden. Die Art und der Einfluß der Störungen sind abhängig von den jeweiligen Bewölkungsverhältnissen wie z.B. Dichte und Höhe der Wolkenschicht. Aufgrund dieser Streuungen tritt bei starker Bewölkung im untersuchten Spektralbereich bei $1.53 \mu\text{m}$ eine zusätzliche Linienemission auf, die die Linienintensität des $P_1(3)$ -Übergangs verfälschen kann. Es handelt sich hierbei um eine Quecksilber-Linienemission, die anhand ihrer spektralen Position identifiziert werden kann (vgl. Abb. 11). Spektren, die Kontaminationen dieser Art aufweisen, werden aussortiert und gehen nicht in die Temperaturberechnung ein.

Die ins Gesichtsfeld der Spektrometer gestreute Stadtbeleuchtung erzeugt außer der oben angesprochenen Linienstörung einen kontinuierlichen Untergrund, der als Untergrund-Intensität den OH^* -Linienemissionen überlagert ist.

Diese Untergrund-Intensität ist für den Wellenlängenbereich von 1.52 - $1.55 \mu\text{m}$ in erster Näherung konstant und verschiebt die aus den Intensitäten nach (2.6) berechneten Temperaturen zu höheren Werten.

Anhand der gemessenen $P_1(4)$ -Linienintensität kann die Untergrund-Intensität in erster Näherung nach folgender Formel bestimmt werden:

$$U = \frac{m_i - a \cdot I_{g \cdot m}(P_1(4))}{1 - a} \quad (2.8)$$

- mit : m_i \equiv Intensitätsminimum zwischen $P_1(4)$ -Linienemission und Emissionen des R-Zweigs der $\text{OH}^*(4,2)$ -Bande
[rel. Einheit]
 U \equiv Untergrund-Intensität [rel. Einheit]
 a \equiv Prozentualer Anteil der $P_1(4)$ -Linienemission an m_i , dieser Faktor ist von der Halbwertsbreite des Spektrometers abhängig
 $I_{g \cdot m}$ \equiv gemessene $P_1(4)$ -Intensität
[rel. Einheit]

Dieser Ausdruck beinhaltet außer den durch Streulicht verfälschbaren Meßgrößen m_i und $I_{gem}(P_1(4))$ die geräteabhängige Konstante a . Zur Ermittlung dieser Konstanten geht man folgendermaßen vor:

Bestimmung der Intensität im Intensitätsminimum zwischen $P_1(4)$ -Linienemission und Emission des R-Zweiges der $OH^*(4.2)$ -Bande in offensichtlich ungestörten, klaren Meßnächten (12.07.- 14.07. 1989, Wuppertal).

In diesen Nächten kann man davon ausgehen, daß die Untergrund-Intensität U keinen Einfluß auf die Intensitätsmessungen hat. Für diese Meßbedingungen vereinfacht sich Formel (2.8) wie folgt:

$$a = \frac{m_i}{I_{gem}(P_1(4))} \quad (2.8 a)$$

Nach Berechnung dieses Verhältnisses erhält man folgende a -Werte für die verwendeten Spektrometer:

Spektrometer I : $a_1 = 13 \%$
Spektrometer II : $a_2 = 15 \%$

Die Intensitäten werden nun für Messungen mit den Spektrometern I und II entsprechend der jeweiligen Konstanten a_1 und a_2 auf den nach (2.8) berechneten Untergrund U korrigiert:

$$\begin{aligned} I_{kor}(P_1(2)) &= I_{gem}(P_1(2)) - U \\ I_{kor}(P_1(3)) &= I_{gem}(P_1(3)) - U \\ I_{kor}(P_1(4)) &= I_{gem}(P_1(4)) - U \end{aligned} \quad (2.9)$$

mit: I_{kor} = Untergrundkorrigierte Intensität
[rel. Einheit]

Die Berechnung der Rotationstemperatur nach (2.6) wird mit den untergrundkorrigierten Intensitäten durchgeführt. Spektren, die einen Untergrund $U > 5\%$ aufweisen, werden zur Berechnung der Rotationstemperatur nicht benutzt.

2.4 Abschätzung des Temperaturfehlers

Bei der Angabe des Temperaturfehlers der nach den vorgestellten Verfahren bestimmten Atmosphärentemperatur in ca. 86 km Höhe muß zwischen systematischem und statistischem Fehler unterschieden werden.

Der systematische Temperaturfehler resultiert aus Ungenauigkeiten in der Bestimmung des OH*(4,2)-Bandenuntergrunds und aus Temperaturabweichungen auf Grund der benutzten Einsteinkoeffizienten. Dieser Fehler kann zu ± 2 K abgeschätzt werden (Lange, 1982). Zusätzlich ist zu beachten, daß die aus den OH*-Emissionen abgeleitete Temperatur ein gewichtetes Mittel über die Breite der Schicht ist.

Der statistische Fehler der Temperaturableitung nach (2.6) ist abhängig vom Rauschanteil des Meßsignals und der Intensität der gemessenen OH*-Emissionen. Berechnungen führen auf folgende Fehlerabschätzung:

$$\frac{\Delta T}{T} = 1.2 \cdot \frac{N}{S} \quad (2.10)$$

mit: N = Rauschanteil des Meßsignal
[rel. Einheit]

S = gemessene OH*-Intensität
[rel. Einheit]

(Lange, 1982)

Dieser Fehler wird als Temperaturfehler eines einzelnen Spektrums benutzt. Die Größe des Quotienten N/S ist durch das Detektorrauschen der in den Spektrometern I und II eingesetzten Detektoren und durch die Intensitätsvariationen der gemessenen IR-Strahlung festgelegt. Da die Intensität von Nacht zu Nacht stark schwanken kann, ergeben sich auch bei sonst gleichen Bedingungen unterschiedlich große Fehler.

Durch Mittelung über mehrere Rotationstemperaturen verringert sich der statistische Fehler auf Grund des N/S-Verhältnisses. Der statistische Fehler der Temperaturbestimmung und Variationen der Atmosphärentemperatur gehen in die Größe der 1-Sigma-Schwankung des Temperaturmittelwertes ein. Dies bedeutet, daß nicht nur die Temperaturungenauigkeiten, die auf den Rauschanteil des Meßsignals zurückgeführt werden können, sondern auch tatsächliche Temperaturänderungen im Bereich der OH*-Schicht in die Größe der 1-Sigma-Schwankung eingehen.

Aus diesem Grunde sollte die Angabe der Schwankung der mittleren Temperatur als konservative Fehlerabschätzung, die den Meßfehler überbewertet, benutzt werden.

3. Meßsystem

3.1 Beschreibung der Spektrometer

Der Meßaufbau der benutzten Spektrometer ist auf die nachzuweisende Strahlung, d.h. auf den Wellenlängenbereich und die zu erwartende Intensität, sowie Störeinflüsse optimiert.

Die beiden benutzten Spektrometer werden im weiteren mit Spektrometer I und Spektrometer II bezeichnet.

Der prinzipielle Meßaufbau ist für die Spektrometer I und II gleich (siehe Abb. 5a - 5d).

- Atmosphärische IR-Strahlung fällt zunächst auf einen um die optische Achse der Spektrometer drehbaren und um 45° zu dieser Achse geneigten *Umlenkspiegel* (Umlenkspiegel 1). Mit diesem drehbaren Umlenkspiegel sind je nach Meßbedingungen bzw. Anforderungen unterschiedliche Zenitwinkel einstellbar. Um Kontamination der Umlenkspiegel, z.B. durch Staub, zu verhindern, befinden sich die Umlenkspiegel unter einer *Glas-kuppel*.
- Im Meßaufbau des Spektrometers I passiert die IR-Strahlung nun ein *Blendensystem zur Streulichtreduzierung* (Baffle).
- Die IR-Strahlung wird, bevor sie auf den Eintrittsspalt der Monochromatoren trifft, durch einen *Lichtzerhacker* (Chopper) periodisch unterbrochen, um eine weitere Bearbeitung mit dem Lock-In-Verfahren (Homann, 1987) zu ermöglichen. Das hierbei ebenfalls benötigte Referenzsignal wird am Chopper erzeugt. Das Referenzsignal ist mit derselben Periode wie die nachzuweisende Strahlung moduliert.
- Nach Passieren dieser optischen Komponenten wird die IR-Strahlung in einem *Monochromator* spektral zerlegt. Im Meßaufbau des Spektrometers I handelt es sich um einen mit einem Reflexionsgitter ($1.2 \mu\text{m}$ Gitterkonstante und 30° Blaze-Winkel) ausgerüsteten *0.5 m Ebert-Fastie-Monochromator*. Im Spektrometer II wird ein Monochromator vom Typ *Czerny-Turner* eingesetzt (Gerndt, 1986). Das in diesem Monochromator eingebaute Reflexionsgitter weist eine Gitterkonstante von $3.5 \mu\text{m}$ auf.

Durch Drehung der Reflexionsgitter wird nun IR-Strahlung einer bestimmten Wellenlänge auf den Austrittsspalt der Monochromatoren gebracht. Die Drehung der Gitter erfolgt mittels eines *Schrittmotors* in Verbindung mit einem *Kugelumlaufspindel*-Getriebe und einem *Sinusstangenantrieb*. Der Sinusstangenantrieb wandelt die lineare Bewegung der Getriebebestände in eine proportionale Drehbewegung des Reflexionsgitters um (Stewart, 1970).

- Die selektierte IR-Strahlung wird nach dem Austrittsspalt der Monochromatoren über einen weiteren *Umlenkspiegel* auf ein *Linsensystem* gelenkt. Dieses Linsensystem bildet den Austrittsspalt auf den Detektor ab.
- Unmittelbar vor dem Detektor befindet sich ein wellenlängenselektierendes *Silizium-Filter* (Silizium-Blocking-Filter) zur Unterdrückung von Strahlung mit $\lambda \leq 1.05 \mu\text{m}$. Diese Strahlung (z.B. sichtbares Licht u.ä.) gelangt in höheren Ordnungen auf den Austrittsspalt der Monochromatoren.
- Bei den in den Spektrometern I und II benutzten Detektoren handelt es sich um *Germanium-Detektoren*. Diese Detektoren weisen im Wellenlängenbereich von $0.8 \mu\text{m}$ bis $1.8 \mu\text{m}$ bei einer Betriebstemperatur von 77 K eine hohe Empfindlichkeit bei geringem Eigenrauschen auf.
- Die Steuerung der Spektrometer sowie die direkte (On-Line-) Verarbeitung der in einer nachgeschalteten Elektronik aufbereiteten Detektorsignale erfolgt mit einem *Mikrocomputer* (Spektrometer I: IBM-AT, Spektrometer II: CBM 8032).

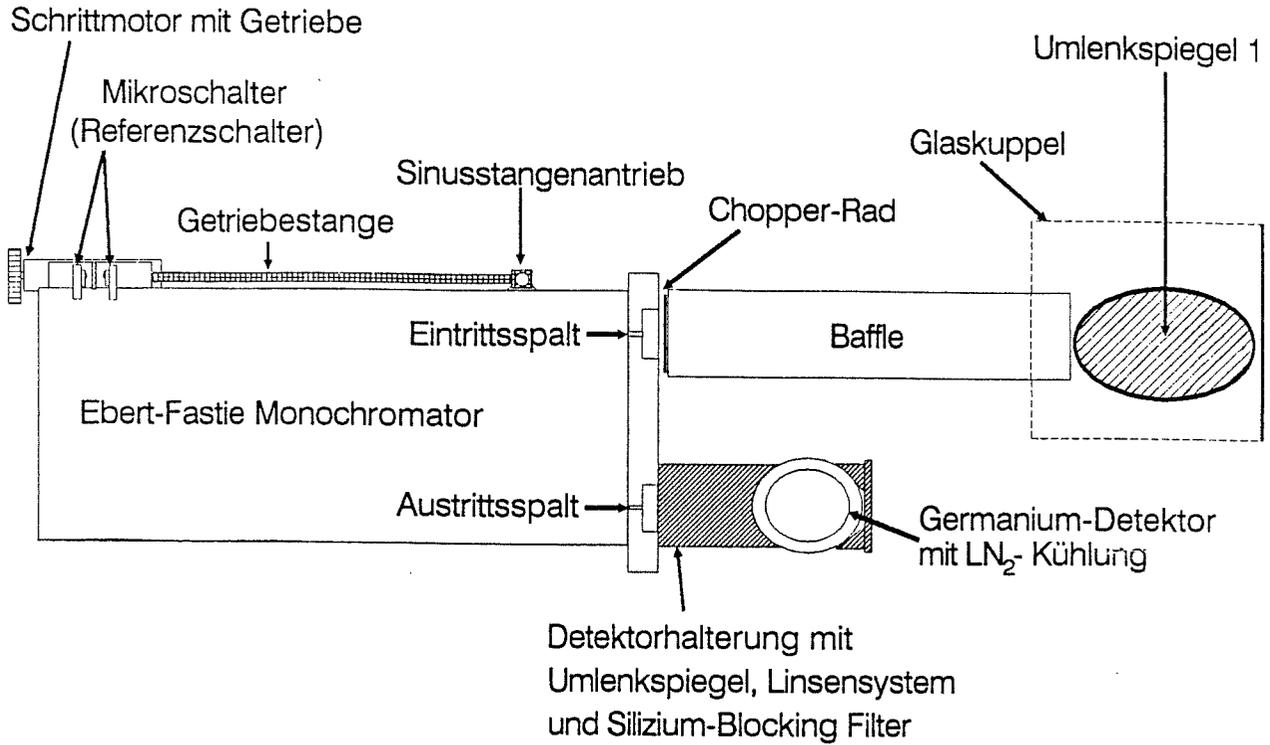


Abb. 5a: Spektrometer I: Skizze des Spektrometereaufbaus (Aufsicht).

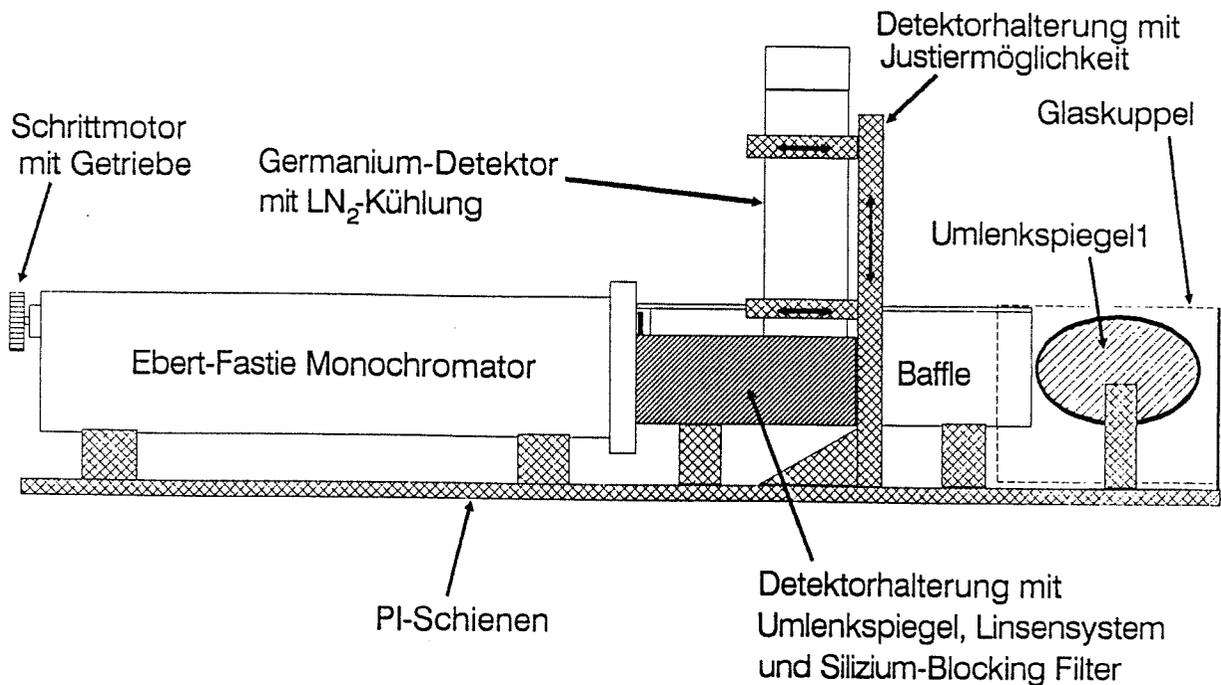


Abb. 5b: Spektrometer I: Skizze des Spektrometereaufbaus (Seitenansicht).

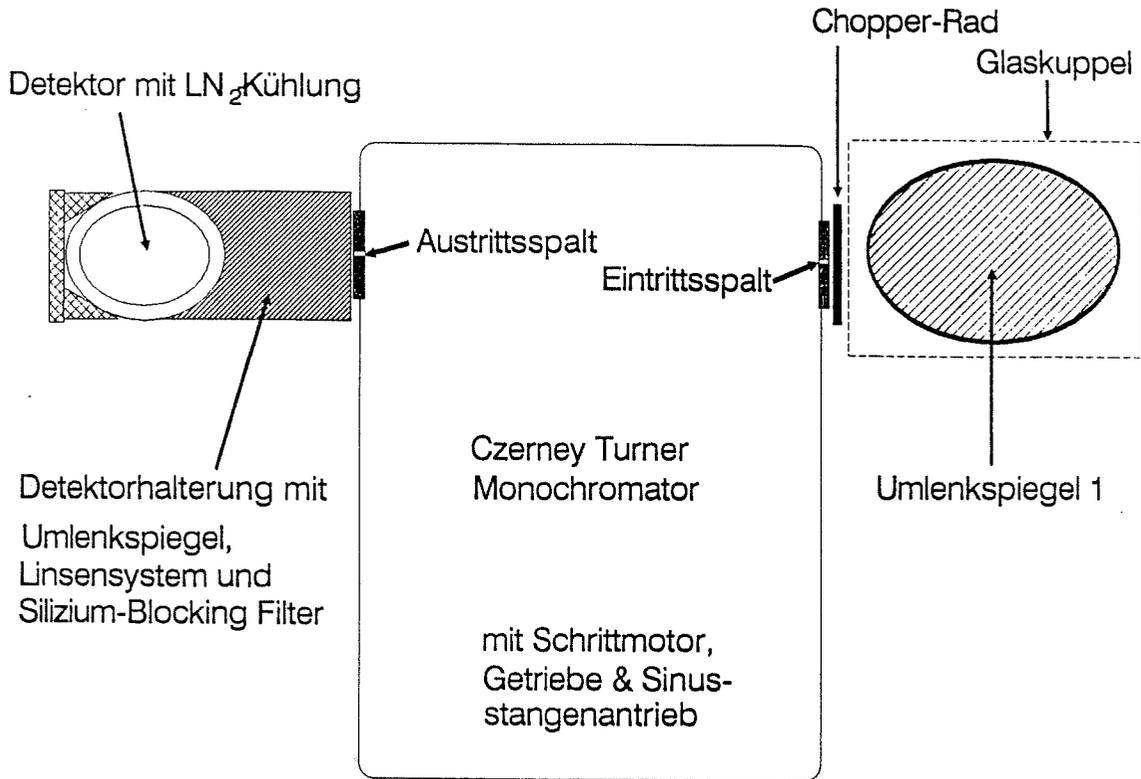


Abb. 5c: Spektrometer II: Skizze des Spektrometernaufbaus (Aufsicht).

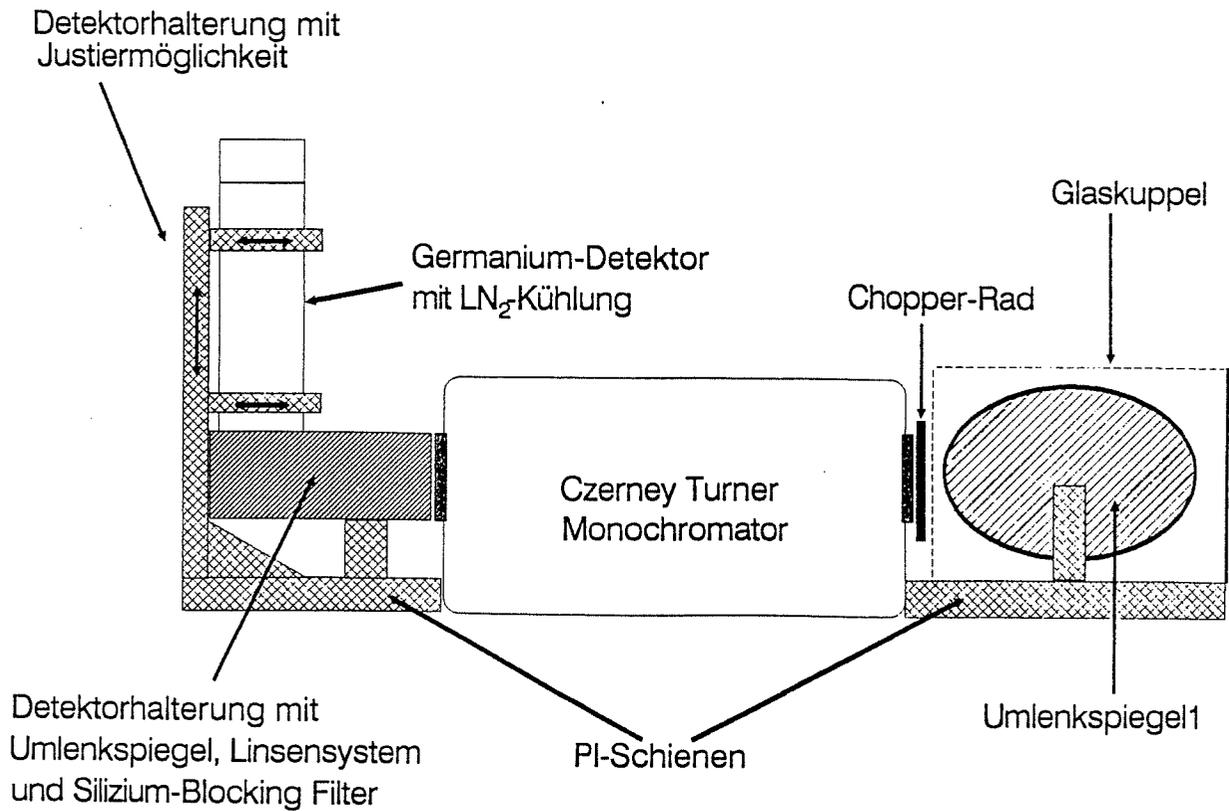


Abb. 5d: Spektrometer II: Skizze des Spektrometernaufbaus (Seitenansicht).

Tab. 2: Leistungsdaten der OH*-Spektrometer

	Spektrometer I	Spektrometer II
Monochromator:		
Typ	: Ebert-Fastie	Czerny-Turner
Brennweite	: 0.5 m	0.3 m
f-Zahl	: f/7.8	f/4.2
spektrale		
Bandbreite	: 3.3 nm	3.4 nm
Gesichtsfeld	: 7.3°·7.3°	13.5°·13.5°
Etendue	: 0.007 cm ² sr	0.011 cm ² sr
Ein-/Austrittsspalt		
Spaltbreite	: 1.5 mm	0.6 mm
Spalthöhe	: 30 mm	30 mm
Reflexionsgitter		
Gitterkonstante	: 1.2 μm	3.5 μm
Blazewellenlänge	: 1.2 μm	3.5 μm
beleuchtete		
Gitterfläche	: 64·64 mm ²	72.5·72.5 mm ²
Silizium-Blocking-Filter		
$\lambda_{cut-off}$: 1.05 μm	1.05 μm
Meßbereich [λ]	: 1.05-1.74 μm	1.05-1.74 μm
Meßdauer pro Spektrum		
	: 4 min 20 s	1 min 30 s
Spektrale Auflösung (λ/Δλ)	: 465	451
Räumliche Auflösung		
(Meßhöhe 86 km)		
0°-Zenitwinkel	: 11·11 km ²	20·20 km ²
45°-Zenitwinkel	: 16·22 km ²	29·41 km ²

Spektrometer I

Spektrometer II

Detektor-Typ : intrinsisches Germanium

Noise Equivalent

Power : $3 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$

$5 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$

3.2 Rechnergesteuerte Meßwerterfassung

Der Informationsfluß für Spektrometer I und II ist in Abb. 6a und 6b skizziert. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Spektrometerkonfigurationen liegt in der Erfassung der Gitterposition der jeweiligen Reflexionsgitter und im benutzten Steuerungsrechner.

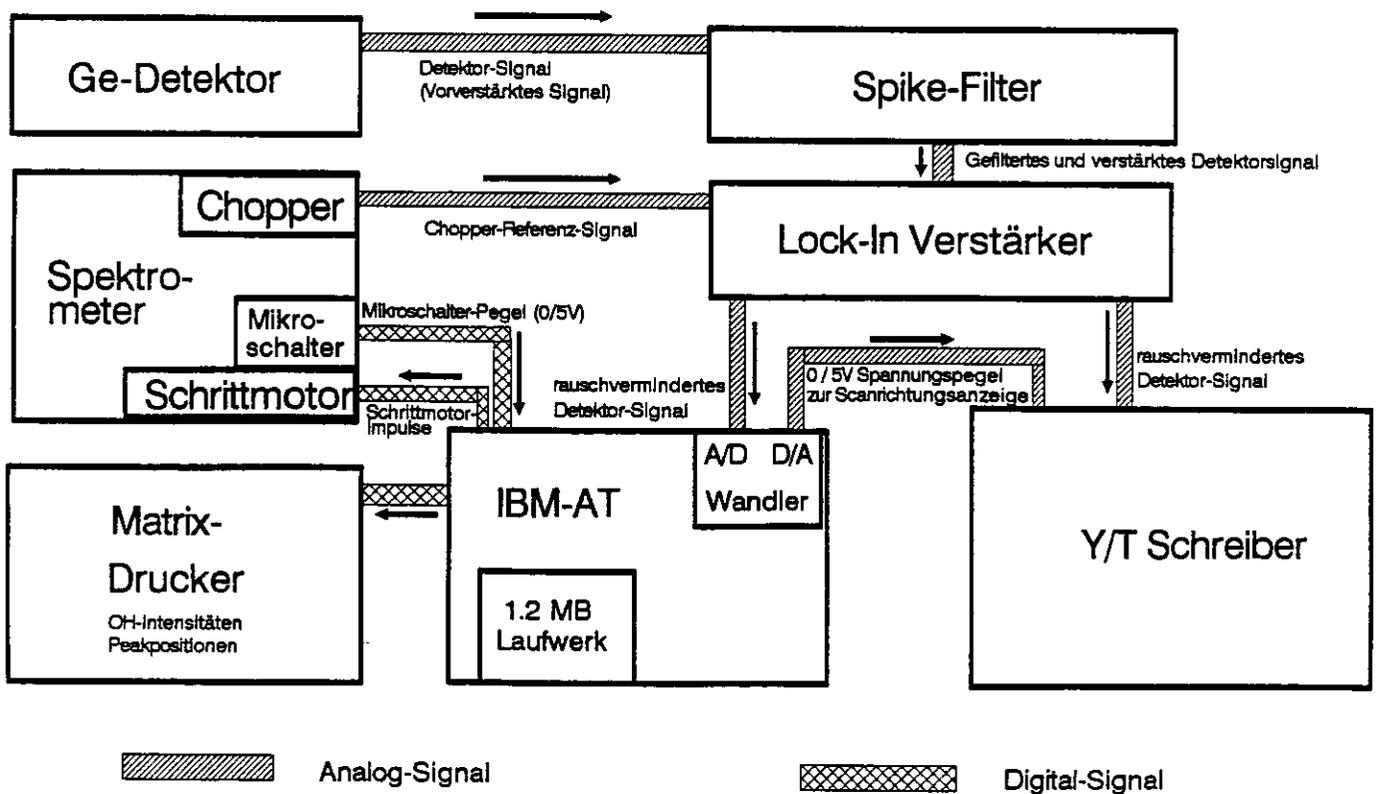


Abb. 6a: Spektrometer I: Informationsfluß-Skizze.

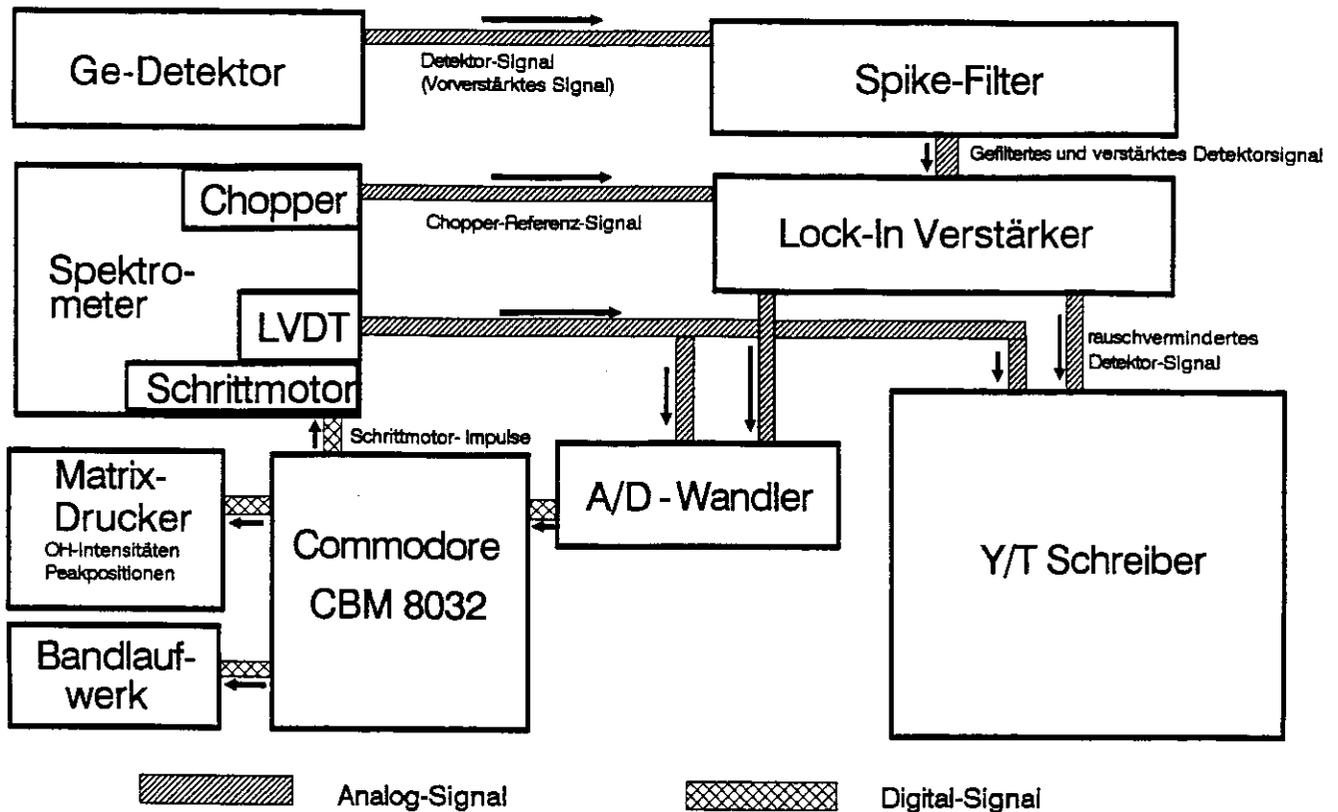


Abb. 6b: Spektrometer II: Informationsfluß-Skizze.

Die Verarbeitung des Detektorsignales erfolgt in den beiden Spektrometern in gleicher Weise:

Die mit dem Chopper periodisch unterbrochene IR-Strahlung gelangt nach der in Kapitel 3.1 beschriebenen Selektion in den Spektrometern I und II auf den Germanium-Detektor. Der Detektor gibt eine der Intensität der Strahlung entsprechende Ausgangsspannung ab. Diese bereits im Detektor vorverstärkte Spannung wird über einen Filter zur Reduzierung von Störsignalen einem Lock-In-Verstärker zugeführt. Zusammen mit dem vom Chopper erzeugten Referenzsignal wird das Detektorsignal nach dem Lock-In-Verfahren (Homann, 1987) verarbeitet. Die Integrationszeit pro Meßwert beträgt 1.25 sec (Spektrometer II) bzw. 4 sec (Spektrometer I).

Dieses rauschreduzierte Detektorsignal wird nun sowohl auf einen Y/T-Schreiber als auch auf einen A/D-Wandler gegeben. Das digitalisierte Detektorsignal wird vom jeweiligen Mikrocomputer aufgezeichnet und verarbeitet.

Die Steuerung der Spektrometer I und II wird folgendermaßen realisiert :

Der jeweilige Steuerungsrechner erzeugt die Schritt- und Drehrichtungsimpulse, die an die Schrittmotortreiber zur Motorbewegung, d.h. zur Gitterbewegung, übergeben werden müssen.

Die Gitterposition, die einer bestimmten Wellenlänge der untersuchten IR-Strahlung entspricht, wird in den beiden Spektrometern in unterschiedlicher Weise ermittelt:

Spektrometer I :

- Die Bestimmung der spektralen Position des Meßsignals wird über zwei Mikroschalter (siehe Abb. 5a) in Verbindung mit der aktuellen Schrittzahl durchgeführt. Vor jeder Messung des OH* (3,1)-Spektrums wird mittels eines Mikroschalters eine spektrale Referenzposition (λ_{Ref}) markiert. Diese Referenzposition und die Wellenlängenänderung pro Motorschritt werden im Rahmen der Wellenlängeneichung bestimmt. Die Schaltgenauigkeit der Mikroschalter und die Positioniergenauigkeit des Schrittmotors beträgt ± 3 Schritte.

Spektrometer II :

- Die Bestimmung der spektralen Position des Meßsignals erfolgt abhängig vom Analogspannungssignal eines LVDT-Wegaufnehmers (Linear Variable Differential Transformers), der direkt mit der Getriebestange des Schrittmotorgetriebes verbunden ist. Zu Beginn eines Meßzyklus wird das Gitter in eine Referenzposition gebracht, in der das LVDT-Signal einer bestimmten Referenzwellenlänge λ_{Ref} entspricht. Ausgehend von dieser Position wird nun der Wellenlängenbereich des Meßsignals durchlaufen (Wellenlängenscan). Die Unsicherheit bei der Bestimmung des LVDT-Signals beträgt ± 3 mV. Die Eichung des LVDT-Signales erfolgt im Rahmen der Wellenlängeneichung.

Die On-Line-Meßwertverarbeitung wird für die beiden Meßsysteme folgendermaßen durchgeführt:

Die Bestimmung der $P_1(2)$ -, $P_1(3)$ - und $P_1(4)$ -Intensitäten erfolgt durch Berechnung der maximalen Intensitäten im Wellenlängenbereich dieser Linienemissionen (Die Intensitäten liegen digital vor).

Durch Bestimmung der Strahlungsintensität im Wellenlängenbereich der in Kap. 2.3 beschriebenen Linienstörung ist es möglich, eine automatische Aussortierung der durch diese Emissionen verfälschten Spektren zu erreichen. Werden in diesem Wellenlängenbereich Intensitäten gemessen, die in der Größenordnung der $P_1(3)$ -Intensitäten liegen, so gehen diese Spektren nicht in die Temperaturableitung ein. Durch Ermittlung der minimalen Intensitäten im Bereich zwischen $P_1(4)$ -Linienemission und Emissionen der $OH^*(4,2)$ -Bande wird für das überwiegend in Wuppertal eingesetzte Spektrometer II nach Formel 2.8 eine Untergrundkorrektur der Intensitäten vorgenommen. Die OH^* -Rotationstemperaturen werden nach Formel 2.6 bestimmt.

Nach einer Meßnacht wird nun mit der Y/T-Schreiberaufzeichnung der gemessenen Spektren eine weitere Qualitätskontrolle durchgeführt. Bei dieser Kontrolle werden Spektren, die Intensitätstrends zeigen, manuell aussortiert. Erst nach dieser abschließenden Kontrolle der gemessenen OH^* -Intensitäten wird die mittlere Temperatur der entsprechenden Nacht berechnet.

3.3 Auswirkung hochenergetischer Teilchen auf das Detektorsignal

Die in den Spektrometern I und II eingesetzten Germanium-Detektoren zeichnen sich nicht nur durch eine hohe Empfindlichkeit im nahen Infrarot aus, sondern auch durch Empfindlichkeit für radioaktive Strahlung. Diese Empfindlichkeit ist im großen Wirkungsquerschnitt des Germaniums für hochenergetische Teilchen, wie z.B. γ -Quanten, begründet.

Der Durchgang eines hochenergetischen Teilchens, z.B. aus der Höhenstrahlung, durch den Germanium-Detektor erzeugt Spannungsimpulse des Detektorausgangssignals, die sich durch eine steile Anstiegsflanke und durch gegenüber dem normalen Meßsignal um bis zu 100-fach höhere Amplitude auszeichnen (vgl. Abb. 7). Derartige Spannungsimpulse werden als Spikes bezeichnet. Sie verursachen eine zusätzliche Variation des Lock-In-Ausgangssignals und vergrößern dadurch die als Rauschen bezeichnete Variation des Meßsignals. Diese Spannungsimpulse werden deshalb in einer Filterschaltung (Spike-Filter) aus dem Meßsignal herausgefiltert. Das Detektorsignal wird im Spike-Filter zum einen einer Verstärkerschaltung und zum anderen einer Differenzierschaltung zugeführt (siehe Abb. A2). Beim Auftreten eines Spikes wird durch die steile Anstiegsflanke des Detektorsignals in der Differenzierschaltung ein Spannungspuls erzeugt, der einen elektronischen Schalter ansteuert.

Bei Betätigung dieses Schalters wird das Ausgangssignal der Verstärkerschaltung unterdrückt. Nach dem Spike-Filter liegt ein bereinigtes vorverstärktes Detektorsignal vor.

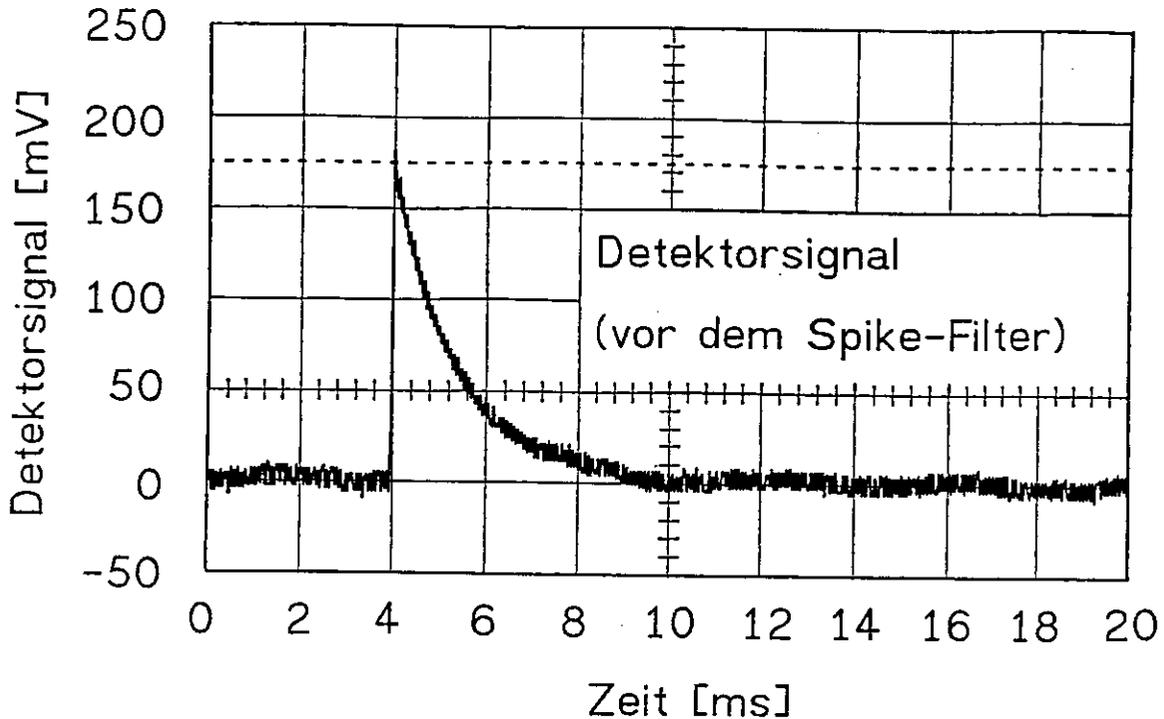


Abb. 7: Detektorsignal bei einem Spike-Ereignis.

Der Detektor wurde gegen IR-Strahlung abgeschirmt, so daß das Ausgangssignal des Detektors nur Detektorrauschen und Spike-Impulse zeigt.

3.4 Eichungen

Bevor mit den Spektrometern I und II Messungen der OH*-Emissionen erfolgen können, müssen folgende Eichungen durchgeführt werden:

- *Wellenlängeneichung*, d.h. Bestimmung der Gitterposition in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ [µm].
- *Empfindlichkeitseichung*, d.h. Ermittlung der relativen Empfindlichkeitsänderungen der Spektrometersysteme an den spektralen Positionen der drei OH*-Emissionslinien.

Die Wellenlängeneichung erfolgt durch Bestimmung der Gitterposition für verschiedene von einer Eichlichtquelle in das Gesichtsfeld der Spektrometer eingestrahlte Wellenlängen.

Die Gitterposition entspricht entweder der Zahl der Motorschritte (Spektrometer I) oder der Spannung des LVDT-Wegaufnehmers (Spektrometer II).

Als Eichlichtquelle wird eine Wolframbandlampe (2500 K-Schwarzkörper) benutzt, deren Ausgangssignal durch einen mit einer Wellenlängenanzeige versehenen Monochromator (McPherson Mod.218) spektral zerlegt wird. Der Fehler der Wellenlängenanzeige ist im Bereich von 1.1 - 1.7 μm kleiner als 1 ‰ (Gerndt, 1982).

Die Wellenlängeneichung erfolgt mit derselben Scangeschwindigkeit und Integrationszeit pro Meßwert, die zur Durchführung der OH*-Messung benötigt werden (s. Tabelle 2).

Aus den Wertepaaren (λ , Gitterposition) wird mittels linearer Regression die entsprechende Eichgerade bestimmt.

$$G = (a \pm \Delta a) \cdot \lambda + (b \pm \Delta b) \quad (3.1)$$

mit: G = Gitterposition [Motorschritte] (Spektrometer I)
 [V] (Spektrometer II)
 λ = eingestrahlte Wellenlänge [μm]
 a = Steigung [Motorschritte/ μm] (Spektrometer I)
 [V/ μm] (Spektrometer II)
 Δa = Fehler der Steigung
 b = Achsenabschnitt [Motorschritte] (Spektrometer I)
 [V] (Spektrometer II)
 Δb = Fehler des Achsenabschnittes

Führt man die Wellenlängeneichung für den Aufwärts- (1.1-1.7 μm) und Abwärtsscan (1.7-1.1 μm) getrennt durch, so erhält man zwei parallele Eichgeraden, die um einen konstanten Betrag gegeneinander verschoben sind. Diese Verschiebung äußert sich in einer Differenz der Achsenabschnitte der Eichgeraden von Auf- und Abwärtsscan. Im weiteren wird diese Verschiebung als *toter Gang* bezeichnet. Ursache dieses toten Gangs ist zum einen mechanisches Spiel im Getriebe der Spektrometer und zum anderen eine Verschleppung des Detektorsignals aufgrund der benutzten Scangeschwindigkeit und Integrationszeit pro Meßpunkt.

$$b_{a u f} = b_{a b} + \text{toter Gang} \quad (3.1 a)$$

mit: $b_{a u f}, b_{a b}$ = Achsenabschnitt Aufwärts-, Abwärtsscan

Dieser tote Gang beträgt:

Spektrometer I : 32 Schritte
 Spektrometer II : 39 Schritte

Unter Benutzung der Wellenlängeneichung wird die spektrale Lage der mit den Spektrometern I und II gemessenen Emissionen wie folgt berechnet:

$$\lambda = (G - b) / a \quad (3.2)$$

Der Fehler dieser Wellenlängenangabe wird folgendermaßen berechnet.

$$\Delta\lambda = \sqrt{((G - b)^2 \cdot (\Delta a/a^2)^2 + (\Delta b/a)^2 + (\Delta G/a)^2)} \quad (3.3)$$

(Gerndt, 1982)

mit: ΔG = Fehler der Gitterposition
 $\Delta G = \pm 3$ Schritte (Spektrometer I)
 $\Delta G = \pm 0.003$ V (Spektrometer II)

Im Spektralbereich von 1.52 - 1.55 μm betragen die Fehler der nach Formel (3.2) abgeleiteten absoluten Wellenlängenangabe :

Spektrometer I : $\Delta\lambda = 0.009 \mu\text{m}$ (Eichung vom 19.06.89)
 Spektrometer II : $\Delta\lambda = 0.005 \mu\text{m}$ (Eichung vom 14.12.89)

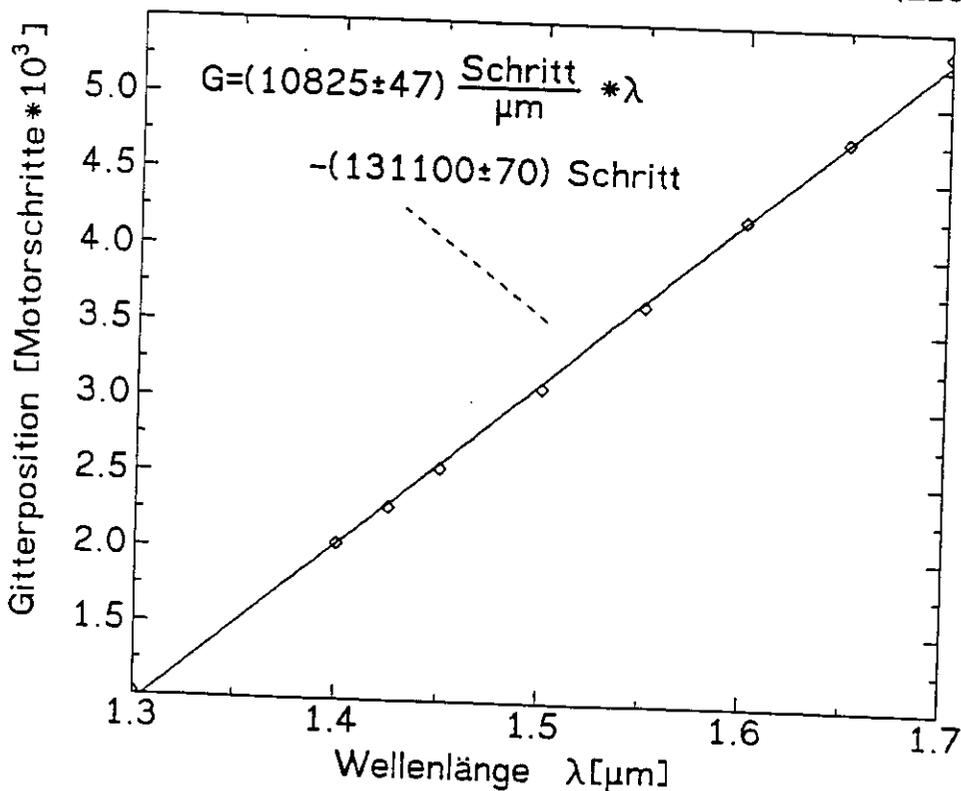


Abb. 8:

Spektrometer I:
 Wellenlängeneichung
 vom 19.06.1989
 Scanrichtung:
 1.3 - 1.7 μm .

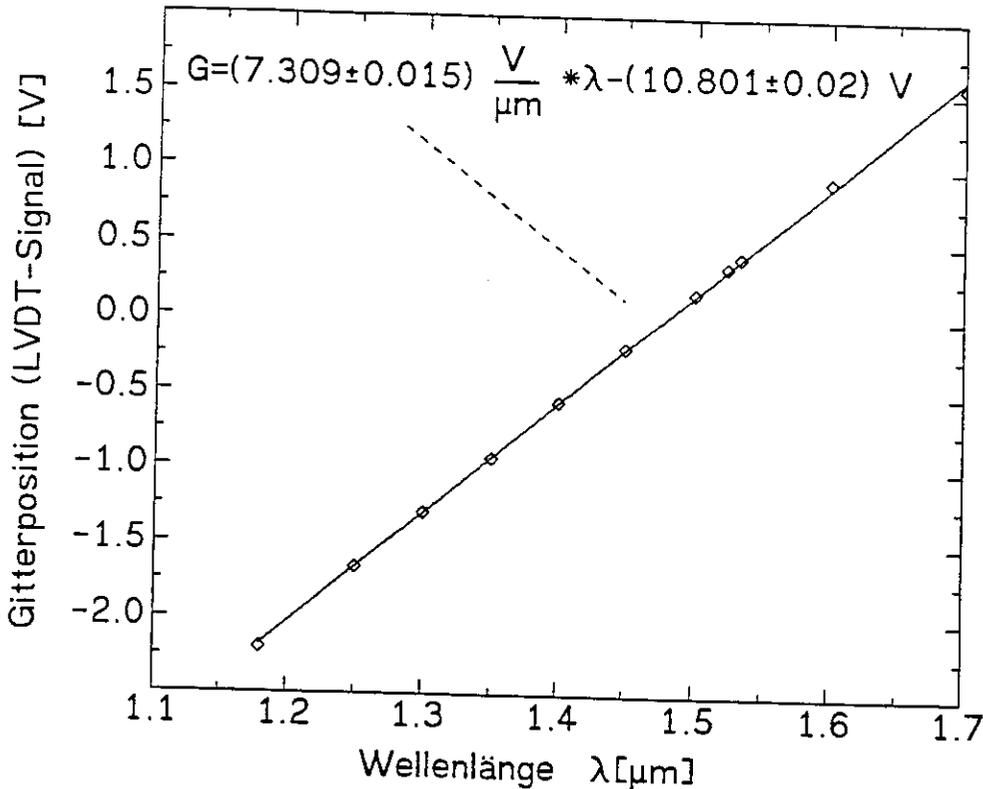


Abb. 9:
 Spektrometer II:
 Wellenlängeneichung
 vom 14.12.1989
 Scanrichtung:
 1.2 - 1.7 μm .

Zur Berechnung der OH^* -Temperaturen nach Formel 2.6 ist es notwendig, die relativen Empfindlichkeitsänderungen der Spektrometer für die Wellenlängen 1.524 μm , 1.533 μm und 1.543 μm zu ermitteln und die gemessenen Intensitäten mit entsprechenden Eichfaktoren $E(\lambda)$ zu wichten.

Die Bestimmung dieser Eichfaktoren wird in der *Empfindlichkeits-eichung* durchgeführt.

Zur Empfindlichkeitseichung des Spektrometers I werden sowohl mehrere Emissionsspektren eines Eichschwarzkörpers bei Temperaturen von 385 K bis 448 K als auch das Emissionsspektrum einer Wolfram-bandlampe (2500 K-Schwarzkörper) aufgenommen.

Die im Bereich der drei Wellenlängenpositionen (1.524 μm , 1.533 μm und 1.543 μm) ermittelten Detektorsignale (s. Abb. 10) werden auf den Betrag des Detektorsignals bei 1.524 μm normiert.

Zur Bestimmung der relativen Empfindlichkeitsänderung wird die Strahlungsleistung eines Schwarzkörperstrahlers nach der Planck-Formel berechnet.

$$L(\lambda, T) = (1.191066 \cdot 10^8 / \lambda^5) \cdot (\exp\{1.43883 \cdot 10^4 / \lambda \cdot T\} - 1)^{-1} \quad (3.4)$$

mit : $L(\lambda, T)$ = Strahlungsleistung [W · m⁻² · sr⁻¹ · μm^{-1}]
 T = Temperatur des Schwarzkörpers [K]
 λ = Wellenlänge [μm]

(Wyatt, 1978)

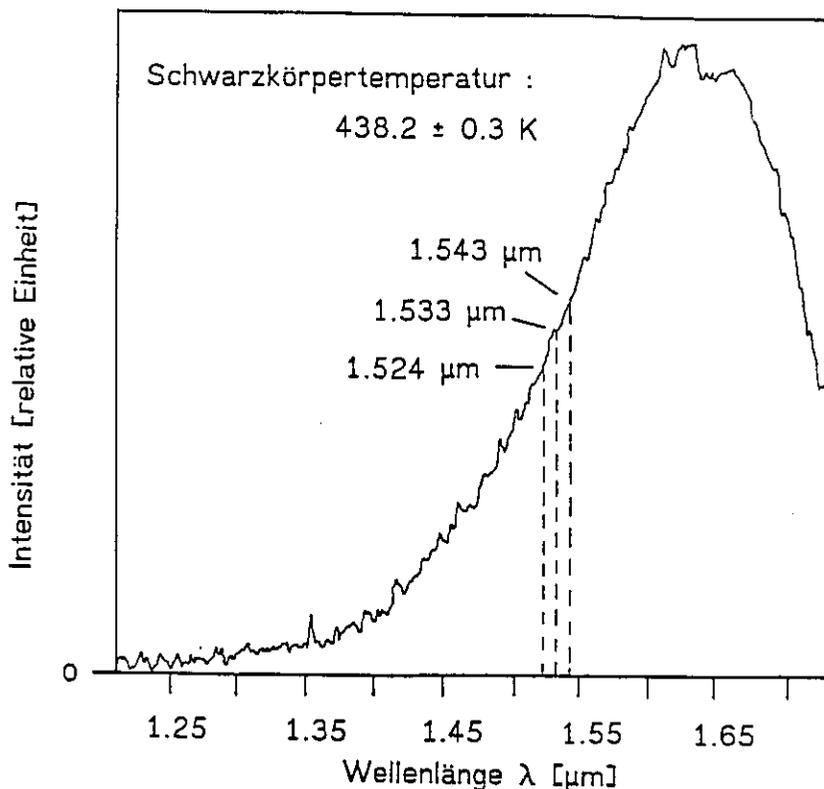


Abb. 10: Spektrometer I :
Schwarzkörperspektrum vom 23.06.1989.

Die nach Formel 3.4 an den drei Wellenlängenpositionen berechnete Strahlungsleistung wird auf die Strahlungsleistung bei 1.524 μm normiert.

Durch Quotientenbildung der normierten gemessenen Detektorsignale mit der normierten berechneten Strahlungsleistung ergeben sich die gesuchten Eichfaktoren $E(\lambda)$.

$$E(\lambda) = \frac{(U_D(\lambda, T) / U_D(1.524 \mu\text{m}, T))}{(L(\lambda, T) / L(1.524 \mu\text{m}, T))} \quad (3.5)$$

mit : $U_D(\lambda, T)$ = Detektorsignal an der durch λ gekennzeichneten Wellenlängenposition bei der Schwarzkörpertemperatur T

$L(\lambda, T)$ = Strahlungsleistung nach 3.4

Die Ursache für Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Eichfaktoren geht auf den Fehler der Wellenlängeneichung, auf den Fehler

der Temperaturmessung des Schwarzkörpers (± 0.3 K), auf Detektorrauschen und Ableseungenauigkeiten bei der Bestimmung der Detektorsignale (± 2 %) zurück. Die Fehler von λ und T gehen direkt in Formel (3.4) ein und wirken sich für unterschiedliche Schwarzkörpertemperaturen verschieden stark aus.

Die Auswertungen von drei Schwarzkörperspektren bei 2500 K und von neun Schwarzkörperspektren im Temperaturbereich von 385 bis 448 K ergaben folgende Eichfaktoren :

Spektrometer I :

2500 K : $E(1.524 \mu\text{m}) = E(1.533 \mu\text{m}) = E(1.542 \mu\text{m}) = 1.0 \pm 2 \%$

385 - 448 K : $E(1.524 \mu\text{m}) = E(1.533 \mu\text{m}) = E(1.543 \mu\text{m}) = 1.0 \pm 7 \%$

Eine umfassende Beschreibung des verwendeten Schwarzkörpers und eine ausführliche Darstellung einer Spektrometereichung wird bei Gerndt (1982) gegeben.

3.5 Bestimmung der Emissionsspektren verschiedener Gasentladungslampen

Die in Kap. 3.4 beschriebene Wellenlängeneichung der Spektrometer ist nach jeder Dejustierung des Gitterantriebes erneut durchzuführen. Derartige Dejustierungen sind bei jedem Transport der Spektrometer zu anderen Meßorten oder bei Veränderungen im Gitterantrieb zu erwarten. Der Eichvorgang mit einem McPherson-Monochromator erfordert einen relativ hohen apparativen Aufwand und birgt die Gefahr, daß auch der benutzte Eich-Monochromator durch Einflüsse beim Transport dejustiert sein könnte.

Aus diesem Grunde war es notwendig, einen Eichstandard zur Durchführung der Wellenlängeneichung am jeweiligen Meßort zu finden, der bei Transporten nicht dejustiert werden kann.

Als Eichstandard bieten sich Gasentladungslampen an, deren Emissionsspektren Linienemissionen im Wellenlängenbereich von 1.2 - 1.7 μm aufweisen.

Als geeignete Eichlichtquellen für die OH*-Spektrometer erwiesen sich Cadmium (Cd)- und Quecksilber (Hg)- Gasentladungslampen. Die Wellenlängen der Linienemissionen wurden dem Tabellenwerk von Zaidel' et al. (1970) entnommen.

Die Wellenlängeneichung erfolgt durch Bestimmung der Emissionsspektren der Gasentladungslampen im Bereich von 1.2 - 1.7 μm .

Den Gitterpositionen der Linienemissionen werden die entsprechenden Wellenlängen zugeordnet. Diese Wertepaare beschreiben die gesuchte Eichgerade der Wellenlängeneichung.

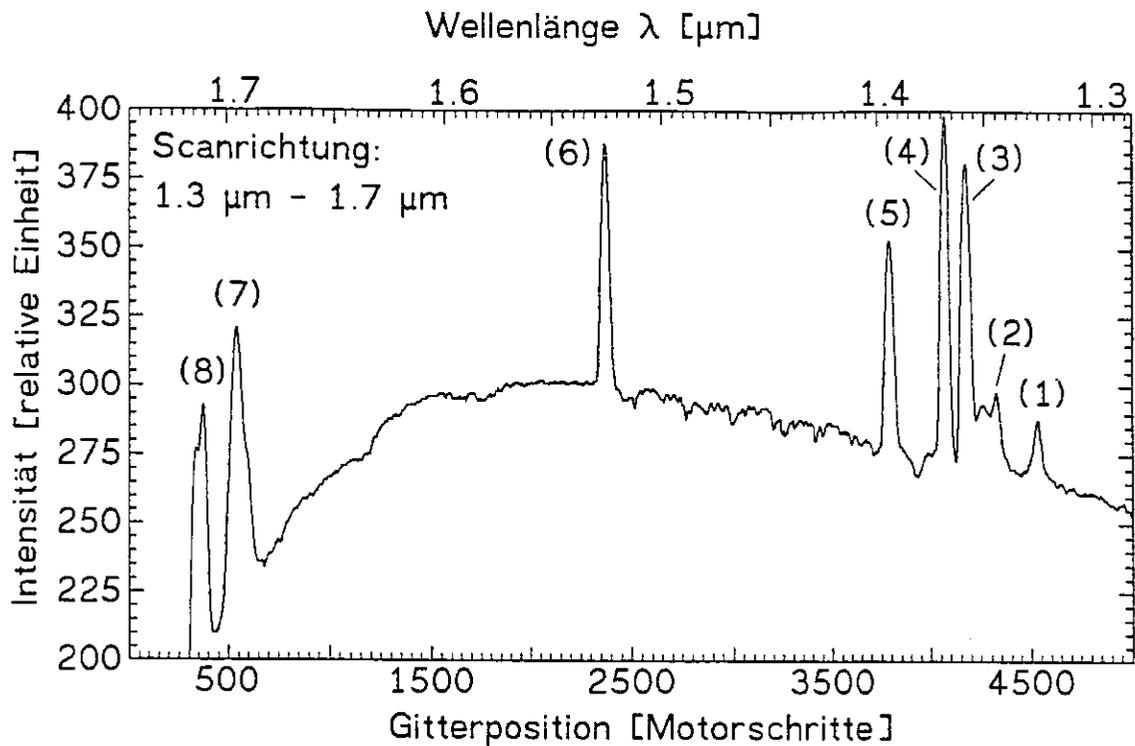


Abb. 11: Spektrometer I : Hg-Eichspektrum einer Osram Hg/10-Spektrallampe.

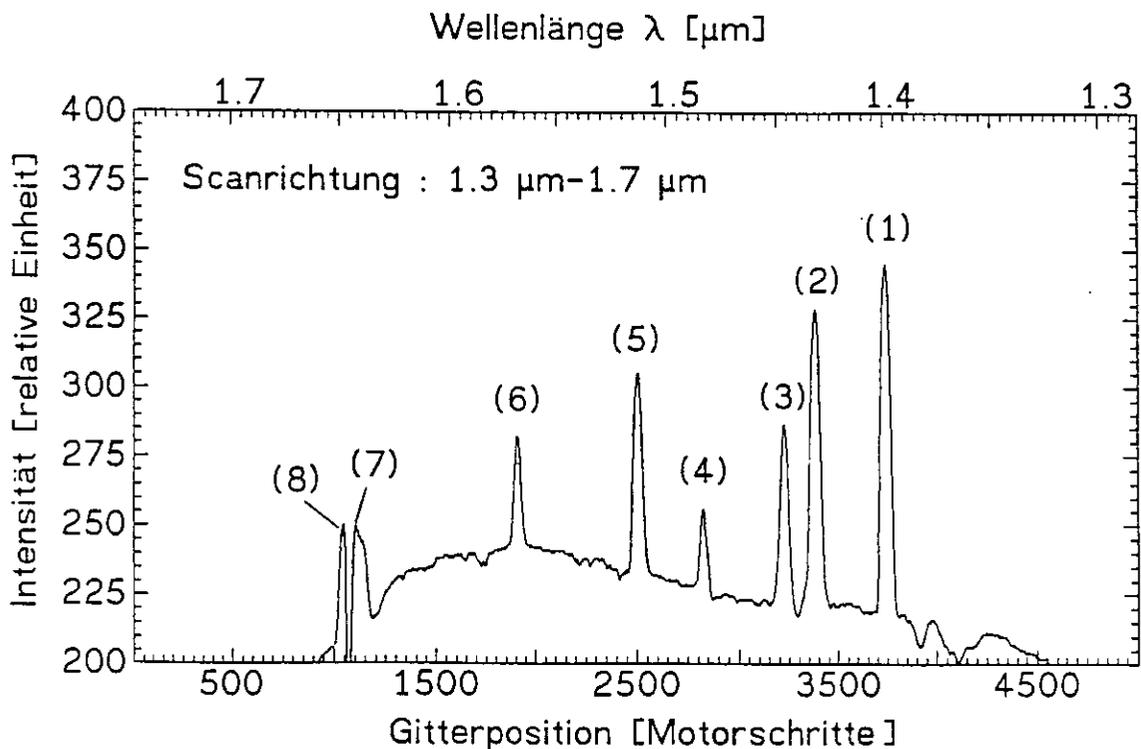


Abb. 12: Spektrometer I : Cd-Eichspektrum einer Osram Cd/10-Spektrallampe.

Die in Abb. 11 und 12 dargestellten Intensitäten der Eichspektren sind nicht auf den Empfindlichkeitsverlauf des Spektrometers I korrigiert. Ferner wurde abweichend von der Wellenlängeneichung vom 19.06.1989 die Lage des Referenzmikroschalters und die Zählrichtung der Motorschritte geändert. Die Übereinstimmung der Wellenlängeneichung zwischen dem in Kapitel 3.4 und dem an dieser Stelle beschriebenen Eichverfahren ist besser als 1 %. Die Angabe der Wellenlänge der in den Abb. 11 und 12 bezeichneten Linienpositionen ist im Anhang (Tab. A1) aufgeführt.

3.6 Interkalibrierung der Spektrometer

Die Bestimmung der kinetischen Temperatur im Bereich der OH^{*}-Schicht erfolgt für die beiden benutzten Spektrometer in prinzipiell gleicher Weise. Die Ableitung der Temperaturen (s. Kap. 2.1) basiert für beide Spektrometer auf IR-Emissionen der OH^{*}-Moleküle derselben Rotations-Vibrationsbande, so daß systematische Unterschiede der ermittelten Temperaturen aufgrund von vermuteten Höhenunterschieden verschiedener Rotations-Vibrationsbanden (Lopez-Moreno et al., 1987) nicht zu erwarten sind. Aufgrund dieser Tatsache ist es möglich, die Spektrometer an verschiedenen Orten einzusetzen und die gewonnenen Daten direkt auf unterschiedliche Temperaturvariationen an diesen Orten zu untersuchen.

Vor diesem direkten Vergleich muß sichergestellt werden, daß unter vergleichbaren Meßbedingungen keine geräteabhängigen systematischen Temperaturverschiebungen vorkommen. Zu diesem Zweck wurden die beiden Spektrometer in der Zeit von Juli bis Dezember 1989 in Wuppertal in einer Interkalibrierungsmessung betrieben.

Um vergleichbare Meßbedingungen zu erhalten, sollten die Gesichtsfelder der Spektrometer überdeckende Bereiche der OH^{*}-Schicht umfassen. Durch in beiden Meßsystemen am Umlenkspiegel 1 (vgl. Kap. 3.1) eingestellte Zenitwinkel von $45^\circ \pm 3^\circ$ werden die Gesichtsfelder auf sich überdeckende Bereiche ausgerichtet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß durch unterschiedliche Gesichtsfeldwinkel von 7.3° (Spektrometer I) und 13.5° (Spektrometer II) nur bedingt vergleichbare Meßbedingungen vorliegen. Bei 45° -Zenitwinkel werden die Temperaturen durch Messung der über eine Fläche von ca. 343 km^2 (Spektrometer I) bzw. 1206 km^2 (Spektrometer II) integrierten Gesamtintensität aller im betrachteten Spektralbereich vorkommenden IR-Emissionen bestimmt (vgl. Abb. A4). Dabei werden nicht nur OH^{*}-Emissionen, sondern auch die in Kap. 2.3 beschriebenen Störstrahlungen von den Spektrometern beobachtet.

Während der Interkalibrierungsmessung konnte die Untergrundkorrektur nur für die mit Spektrometer II gemessenen Intensitäten durchgeführt werden, so daß beim Vergleich der mit beiden Meßsystemen ermittelten Temperaturen auf die unkorrigierten Datensätze zurückgegriffen werden muß.

Zielsetzung beim Vergleich der an verschiedenen Orten ermittelten Temperaturen ist eine Aussage über langfristige Breitengradabhängige Temperaturvariationen. Aus diesem Grunde wurde die Interkalibrierung für die mit den Spektrometern I und II bestimmten unkorrigierten Nachttemperaturmittel durchgeführt.

Im Zeitraum der Interkalibrierungsmessung vom 06.07.1989 bis zum 03.12.1989 wurden an insgesamt 80 Tagen bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen gleichzeitig Messungen mit Spektrometer I und II durchgeführt.

Zur Feststellung einer systematischen Temperaturabweichung wurden die Temperaturresiduen der mit den Spektrometern bestimmten nächtlichen Temperaturmittelwerte berechnet. Die Darstellung dieser Temperaturresiduen erfolgt in Abb. 13, sie werden wie folgt berechnet:

$$T_R = T_{s1} - T_{s2} \quad (3.6)$$

mit : T_R \equiv Temperaturresiduum [K]
 T_{s1} \equiv Temperaturmittelwert Spektrometer I [K]
 T_{s2} \equiv Temperaturmittelwert Spektrometer II [K]

Die Fehlerbalken ergeben sich aus der mittleren Schwankung der Temperaturmittelwerte im betrachteten Zeitraum.

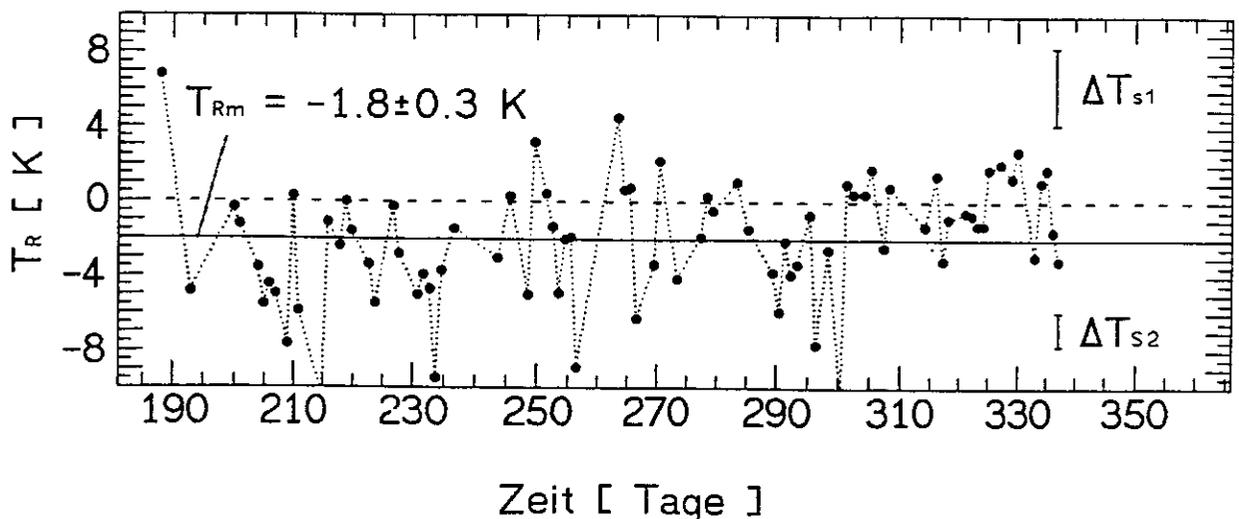


Abb. 13: Temperaturresiduen der Temperaturmittelwerte (Juli - Dezember 1989) (unkorrigierte Daten). Die Streuung der Residuen beträgt ± 2.8 K.

Die mittlere Abweichung der Temperaturmittelwerte zwischen Spektrometer I und II beträgt -1.8 ± 0.3 K. Somit ergibt sich für die Analyse der Daten ohne Differenzierung nach Witterungsbedingungen für das Spektrometer I im Mittel eine systematisch um 1.8 K niedrigere Temperatur.

Nun liegt die Vermutung nahe, daß aufgrund der unterschiedlichen Gesichtsfelder bei starker Bewölkung oder Nebel der Streulichtanteil der Stadtbeleuchtung für das größere Gesichtsfeld eine größere Untergrund-Intensität verursacht. Bei diesen Witterungsbedingungen liegen für die beiden Spektrometer unterschiedliche Meßbedingungen vor. Die Verifizierung dieser Vermutung erfolgt durch zwei Ansätze:

Zum einen wird die Auswirkung eines synthetischen Untergrundes auf den nächtlichen Temperaturmittelwert berechnet, zum anderen selektiert man aus allen Meßtagen Tage mit guten bis sehr guten Meßbedingungen, d.h. Tage mit geringer bzw. ohne Bewölkung oder Nebel. Die Berechnungen mit synthetischem Untergrund ergaben für einen ca. 4-5 Prozent vom Gesamtsignal betragenden Untergrund eine Verschiebung des Temperaturmittelwertes von +1.8 bis +2.0 K.

Im Interkalibrierungszeitraum wurden 41 Tage mit guten Meßbedingungen ermittelt, von diesen 41 Tagen zeichnen sich 16 Tage (10.11.1989-03.12.1989) durch wolkenfreies Wetter aus.

Die Darstellung dieser Temperaturresiduen erfolgt in Abb. 14.

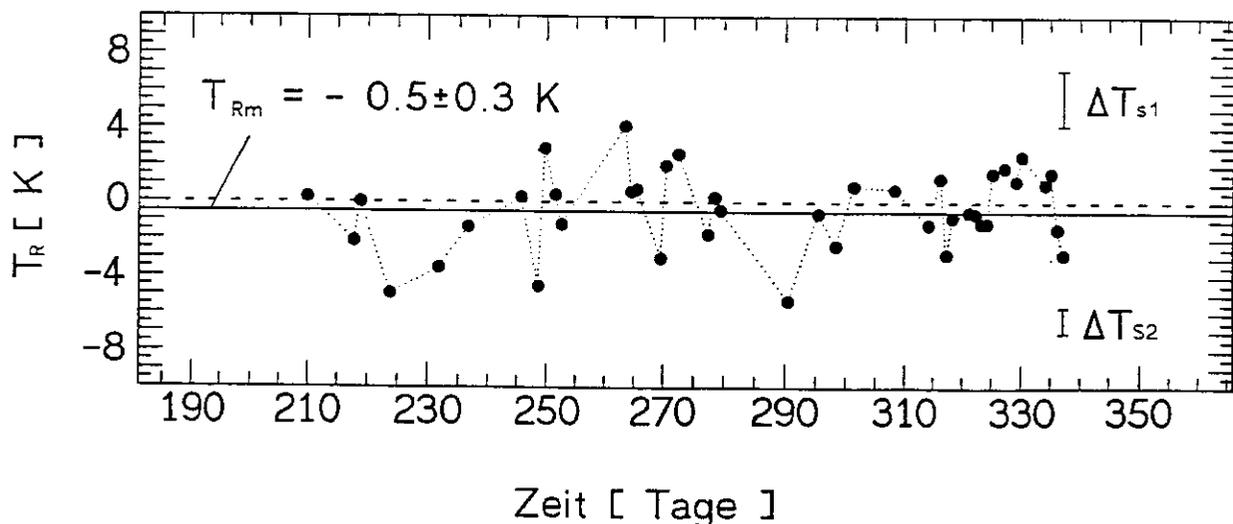


Abb. 14: Temperaturresiduen für gute bis sehr gute Meßbedingungen (Juli - Dezember 1989). (Streuung der Residuen: ± 2.0 K)

Die mittlere Abweichung der selektierten 41 Meßtage beträgt für den Datensatz mit guten bis sehr guten Meßbedingungen -0.5 ± 0.3 K, die Analyse der 16 ausgezeichneten Meßtage ergibt eine Abweichung der Temperaturmittel von -0.2 ± 0.4 K. Es liegt keine statistisch signifikante Temperaturverschiebung vor.

Somit ist die Vermutung bestätigt, daß für unterschiedlich große Beobachtungsbereiche unterschiedlich starke Auswirkungen von Störstrahlung festzustellen sind. Die mit Spektrometer I ermittelten Temperaturen sind offensichtlich wegen des kleineren Gesichtsfeldes wesentlich weniger stark von Streulichtkontaminationen betroffen. Aus den Rechnungen mit synthetischem Untergrund kann man folgern, daß der Untergrund in den Intensitätsmessungen mit Spektrometer I um ca. 4-5 % geringer ist als in Messungen mit Spektrometer II. Die in der Darstellung der Residuen erkennbaren, statistisch verteilten Schwankungen um die mittlere Temperaturabweichung sind wahrscheinlich auf kleinräumige Temperaturvariationen im Bereich der OH^{*}-Schicht zurückzuführen. Diese kleinräumigen Schwankungen können möglicherweise bei Schwerewellenaktivität oder Turbulenzen in den Beobachtungsbereichen auftreten; genaueres über die Ursachen ist nicht bekannt. Eine weitere Möglichkeit zur Erklärung dieser Schwankungen liegt in eventuellen horizontalen Dicke- und Peakhöhenvariationen der betrachteten OH^{*}-Schicht (vgl. Abb. 3a und b). Die Auswirkungen dieser Effekte auf die Temperaturmittelwerte sollte aufgrund der unterschiedlich großen Beobachtungsbereiche der beiden Spektrometer verschieden stark sein.

Die aus Messungen mit den beiden Spektrometern ermittelten Temperaturen stimmen, wenn vergleichbare Meßbedingungen vorliegen, gut überein. Werden Messungen in Gebieten durchgeführt, in denen gestreute Stadtbeleuchtung bei schlechten Witterungsbedingungen Messungen verfälscht, so sollte die in Kap. 2.3 beschriebene Untergrundkorrektur verwendet werden. In zukünftigen Interkalibrierungsmessungen sollte auch Spektrometer I mit einer Untergrundkorrektur betrieben werden, um die Auswirkung von Streulicht auf diese Messungen zu minimieren.

3.7 Vergleich der OH^{*}-Rotationstemperaturen mit anderen Temperaturmeßverfahren

Zur Überprüfung der OH^{*}-Temperaturmessungen nach dem in Kap. 2 vorgestellten Verfahren ist ein Vergleich der Temperaturmessungen mit anderen Meßverfahren sinnvoll. Hierzu stehen höhenaufgelöste Temperaturmessungen eines Rayleigh-LIDAR und ebenfalls höhenaufgelöste Temperaturen eines Falling-Sphere-Meßsystems zur Verfügung . Diese Messungen wurden im Rahmen der DYANA-Kampagne im Zeitraum von Januar bis März 1990 in Biscarosse (44°N/1°W), Frankreich, durchgeführt.

Im Rayleigh-LIDAR (Light Detection And Ranging)-Meßsystem wird mit einem Laser in Zenitausrichtung Licht (532 nm) in die Atmosphäre gestrahlt. Aus dem zurückgestreuten Signal kann die Dichte der Atmosphäre und mit Integrationsverfahren die entsprechende Temperatur bestimmt werden. Ausgangspunkt der Integration ist eine der CIRA 86 entnommenen Atmosphärentemperatur in 90 bis 95 km Höhe.

Die Höheninformation ergibt sich aus der Laufzeit des Signales in der Atmosphäre (Chanin und Hauchecorne, 1984).

Die Temperaturmessungen mit einem Falling-Sphere-Meßsystem werden durch Bestimmung der Fallgeschwindigkeit einer aus metallisierter Kunststofffolie (Mylarfolie) bestehenden aufblasbaren Kugel durchgeführt. Diese Kugel wird mit einer Trägerrakete in Höhen von etwa 120 km gebracht. In dieser Höhe wird die Kugel aus dem Trägersystem ausgestoßen. Durch Bestimmung der Trajektorie der frei fallenden Kugel mit einem Präzisionsradar kann die Fallgeschwindigkeit der Kugel gemessen werden. Aus dieser Geschwindigkeitsinformation werden in komplizierten Berechnungsverfahren sowohl Dichte als auch Temperatur der Atmosphäre im Bereich von ca. 30-90 km Höhe berechnet. Der Anfangswert dieser Temperaturberechnung wird der US76-Standard-Atmosphäre entnommen. Die Höheninformation liefert die mit dem Präzisionsradar gemessene Trajektorie der Kugel (Schmidlin et al., 1988). Bei den LIDAR-Messungen handelt es sich um eine Fernerkundung der Atmosphäre, die durch lange Wege des Meßsignals durch die Atmosphäre, durch Absorptionen, Streuung u.ä. systematischen Störungen unterliegen kann. Bei den Messungen mit dem Falling-Sphere-System handelt es sich um In-Situ-Messungen, d.h. das Meßsystem befindet sich in der beobachteten Atmosphärenschicht. Diese Messungen sollten unbeeinflusst von Streuungen und Absorptionen sein.

Der Vergleich der Meßsysteme soll Aufschluß über die Güte der aus OH*-Messungen abgeleiteten Temperaturwerte geben. Weiterhin kann überprüft werden, ob das OH*-Dichtemaximum der Annahme entsprechend bei 86 km liegt.

Da beide Meßsysteme höhen aufgelöste Temperaturen liefern und das OH*-Spektrometer die über die Schichtdicke integrierte Gesamtintensität der in der OH*-Schicht emittierten IR-Strahlung mißt, ist es notwendig, die LIDAR- und Falling-Sphere-Temperaturen in OH*-äquivalente Temperaturen umzurechnen.

Bei dieser Umrechnung werden aus den Temperaturprofilen der Vergleichssysteme nach Formel 2.7 OH*-Linienintensitäten berechnet. Die Intensität der OH*-Emissionen bei einer bestimmten Temperatur wird mit dem angenommenen Dichteprofil der OH*-Moleküle der 3,1-Bande (vgl. Kap. 2.2) gewichtet und über das Schichtprofil integriert. Diese aus den Temperaturprofilen abgeleiteten Gesamtintensitäten werden mit Formel 2.6 in OH*-Temperaturen umgerechnet (von Zahn et al., 1987).

Die Temperaturprofile der LIDAR-Messungen sind über eine komplette Meßnacht gemittelte Daten. Der Zeitbereich der Falling-Sphere-Messungen umfaßt nur die Zeit des Durchganges der Kugel durch eine bestimmte Höhenschicht, d.h. es liegt keine zeitliche Mittelung vor. Aus diesen Grund wurden zum Vergleich mit den LIDAR-Messungen die Temperaturmittel der OH*-Messungen einer kompletten Meßnacht benutzt. Zum Vergleich mit den Falling-Sphere-Messungen wurden die OH*-Temperaturen über eine Zeitspanne von ± 5 Minuten um die Durchgangszeit der Falling-Sphere durch die OH*-Schicht gemittelt. Erst nach diesen Berechnungen ist ein Vergleich der OH*-äquivalenten LIDAR- und Falling-Sphere-Temperaturen mit den gemessenen OH*-Temperaturen möglich.

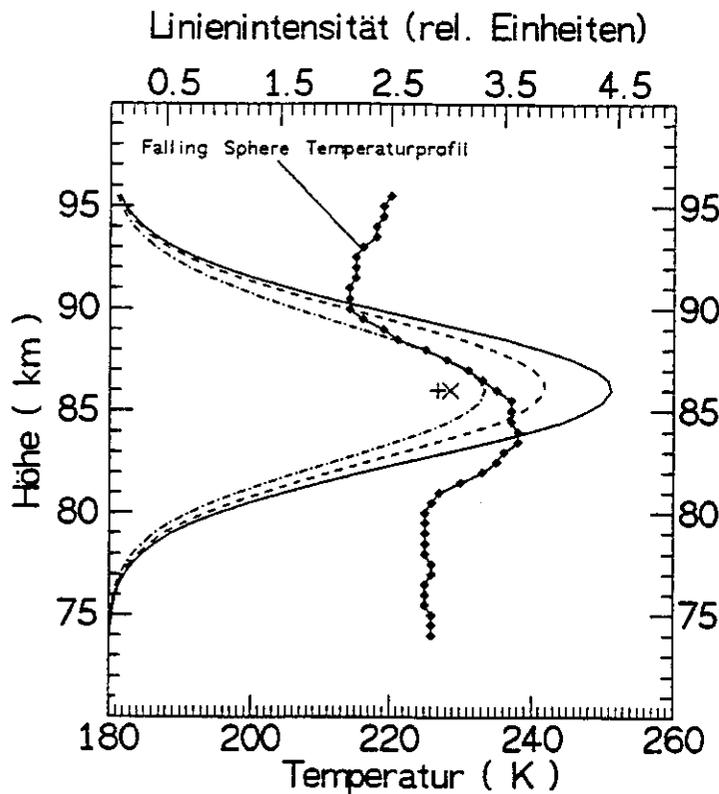


Abb. 15:
Temperaturprofil einer Falling-Sphere-Messung, 22.02.1990, Biscarosse.

+ = OH*-Temperatur
x = OH*-äquivalente Falling-Sphere-Temperatur

In Abb. 15 wird exemplarisch dargestellt, wie aus höhen aufgelöster Temperaturinformation die entsprechende OH*-äquivalente Temperatur berechnet wird. Die durchgezogene Linie zeigt das aus Falling-Sphere-Messungen abgeleitete Temperaturprofil. Die drei gaussförmigen Kurven geben den Intensitätsverlauf der OH*-Linienemissionen gewichtet mit dem angenommenen Schichtprofil wieder. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Fehlerbalken der Falling-Sphere-Messung, die im Bereich von 2 K liegen, verzichtet. Die OH*-äquivalente Temperatur wird durch ein sternförmiges Symbol, die gemessene OH*-Temperatur durch ein Kreuz angedeutet.

Insgesamt 21 LIDAR-Messungen und 12 Falling-Sphere-Messungen wurden nach dem beschriebenen Verfahren bearbeitet.

Eine Liste der OH*-äquivalenten LIDAR- und Falling-Sphere-Temperaturen im Vergleich mit den gemessenen OH*-Temperaturen ist im Anhang gegeben (siehe Tab. A3).

Systematische Unterschiede zu den OH*-Temperaturen werden analog zu Kap. 3.6 durch Berechnung der Temperaturresiduen zwischen gemessener und äquivalenter Temperatur untersucht.

$$T_R = T_S - T_{EQ} \quad (3.7)$$

mit: T_R \equiv Temperaturresiduum [K]
 T_S \equiv spektrometrisch gemessene OH*-Temperatur [K]
 T_{EQ} \equiv OH*-äquivalente Temperatur der Vergleichsmessungen mit LIDAR und Falling-Sphere [K]

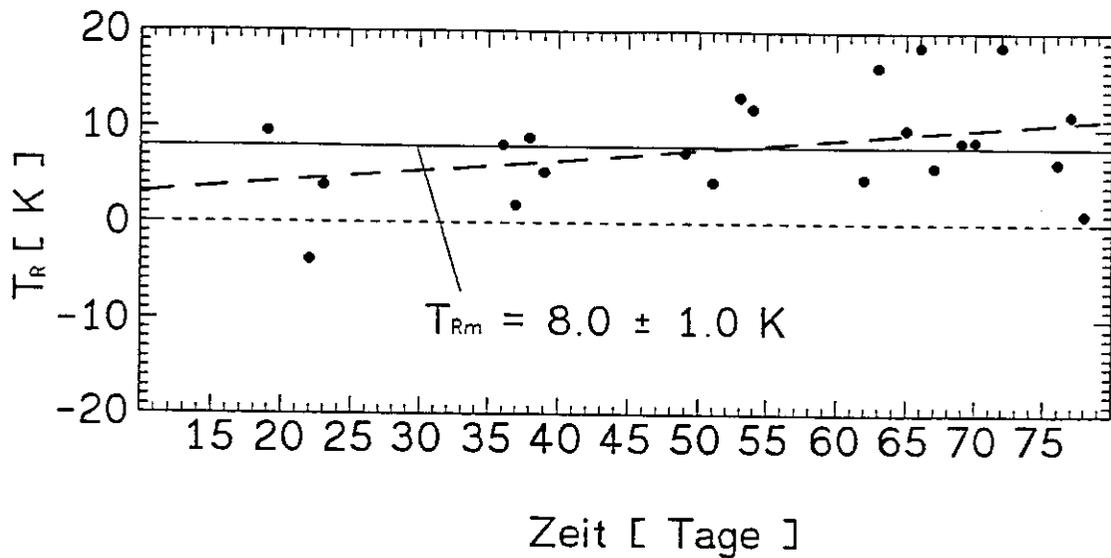


Abb. 16: Temperaturresiduum von OH*- und OH*-äquivalenten LIDAR-Temperaturen (Tag 1 \equiv 01.01.1990).

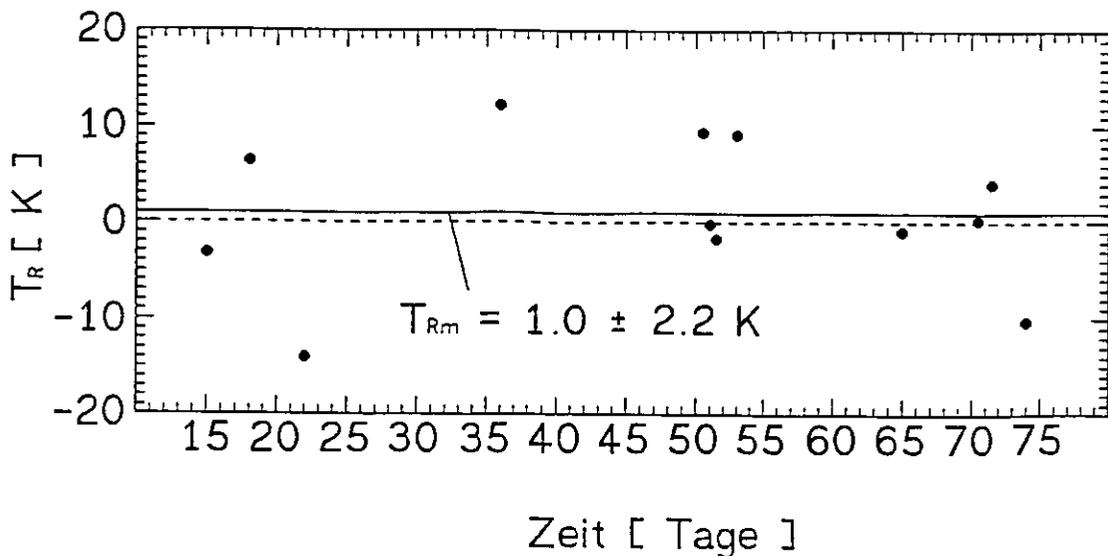


Abb. 17: Temperaturresiduum von OH*- und OH*-äquivalenten Falling-Sphere-Temperaturen (Tag 1 \equiv 01.01.1990).

Das mittlere Temperaturresiduum zwischen den Vergleichsmeßsystemen und der OH*-Messung beträgt:

LIDAR : $T_{r_m} = 8.0 \pm 1.0$ K (siehe Abb. 16)
Falling-Sphere : $T_{r_m} = 1.0 \pm 2.2$ K (siehe Abb. 17)

Beim direkten Vergleich der Meßsysteme muß auch die räumliche Mittelung der OH*-Messung berücksichtigt werden. Das Gesichtsfeld des für diesen Vergleich benutzten Spektrometers I wurde durch Einstellung des Umlenkspiegels 1 auf 45° auf eine Fläche von 343 km² im Bereich der OH*-Schicht ausgerichtet (Tab. 2). Die OH*-Temperaturen sind somit sowohl räumlich als auch zeitlich gemittelt.

Die Temperaturresiduen mit den LIDAR-Messungen zeigen eine deutliche, statistisch signifikante Abweichung von den OH*-Messungen.

Zwischen den aus Falling-Sphere-Messungen abgeleiteten Temperaturen und den OH*-Temperaturen ist keine signifikante systematische Abweichung feststellbar.

Statistische Schwankungen des Temperaturresiduums von Falling-Sphere- und OH*-Messung um das mittlere Temperaturresiduum können auf zeitliche Variationen der Dicke bzw. der Höhe des Dichtemaximums zurückgeführt werden. Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß die Messungen in ca. 50 km auseinanderliegenden Bereichen der OH*-Schicht erfolgten. Aus diesem Grund können, was sich schon bei der Interkalibrierungsmessung der Spektrometer andeutete (siehe Kap. 3.6), auch horizontale Dicke- und Höhenschwankungen statistische Abweichungen zwischen Falling-Sphere- und OH*-Messungen bewirken. Im Gegensatz zu den Falling-Sphere-Messungen ist eine Beeinflussung der Temperaturableitung aus OH*-Intensitäten durch Bewölkungsänderungen nicht auszuschließen.

Frühere Untersuchungen der OH*-Temperaturen im Vergleich mit anderen Meßverfahren (Gerndt, 1986) zeigen deutlich, daß systematische Temperaturabweichungen der OH*-Temperaturen nicht beobachtet werden. Da auch in unserer Untersuchung mit LIDAR- und Falling-Sphere-Messungen, die im selben Zeitraum erfolgten, keine systematische Temperaturverschiebung zwischen OH*- und Falling-Sphere-Temperaturen feststellbar ist, liegt die Vermutung nahe, daß die LIDAR-Temperaturen systematisch zu tief berechnet werden. Ein Grund hierfür könnte in der Wahl des Anfangswertes des verwendeten Integrationsverfahrens liegen. Dieser Anfangswert kann die Temperaturableitung aus Dichtemessungen der Atmosphäre im Bereich der OH*-Schicht (ca. 1 Skalenhöhe unter dem Anfangswert) deutlich beeinflussen. Dies deutet sich auch in dem in Abb. 16 dargestellten Trend (gestrichelte Linie) an. Um diese Vermutung zu bestätigen, sollten die Berechnungen der LIDAR- und die Falling-Sphere-Temperaturen mit den gleichen Anfangswerten durchgeführt werden.

4. Meßergebnisse

Messungen mit den bereits beschriebenen Spektrometern wurden in der Zeit von 1980 bis 1984 an verschiedenen Orten kontinuierlich durchgeführt (Gerndt, 1986). Diese Messungen wurden 1987 in Wuppertal mit Spektrometer II wieder aufgenommen. Die nach der Wiederaufnahme der OH*-Messungen in Wuppertal ermittelten Temperaturen sind in den Abbildungen 18a-d dargestellt.

Anmerkung zu Abb. 18a-d:

- Tage des betreffenden Jahres werden vom 01.01. an fortlaufend gezählt.
- Bei den Temperaturen handelt es sich um Nachtmittelwerte der OH*-Temperatur (Spektrometer II).
- Der statistische Fehler dieser Mittelwerte liegt zwischen 0.5 und 1.5 K.
- Vom 25.07.1989 an werden die untergrundkorrigierten Temperaturen verwendet (vgl. Kap. 2.3).
- Die CIRA89-Temperaturverläufe gelten für 86 km Höhe.

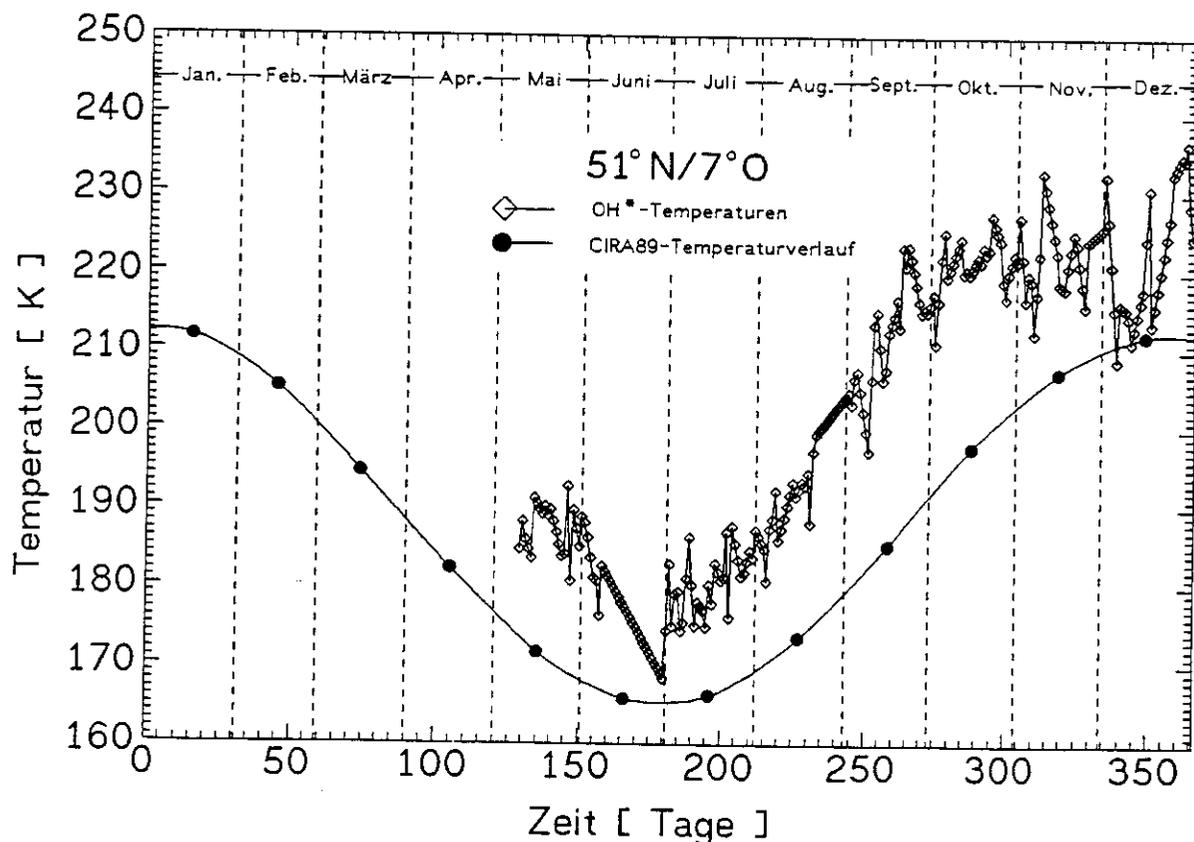


Abb. 18a: OH*-Temperaturmessungen in Wuppertal, 1987.

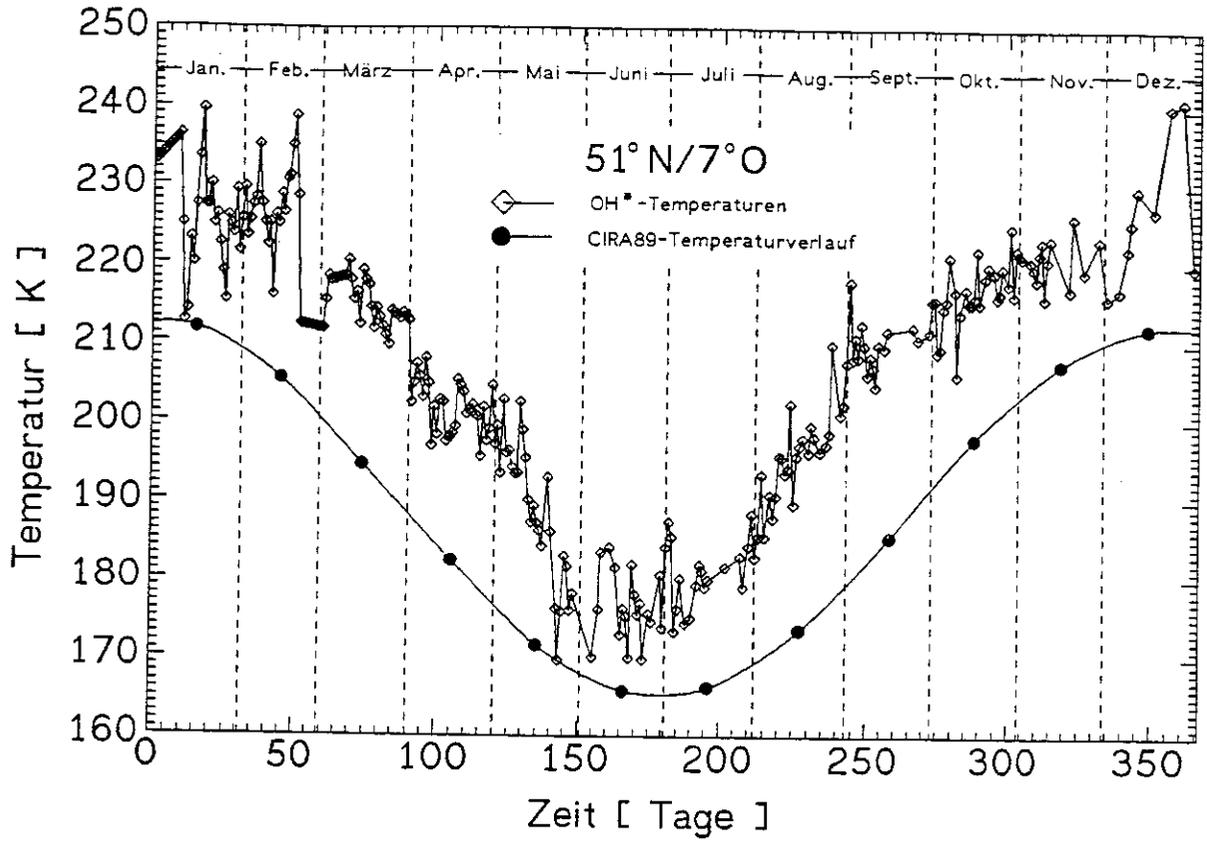


Abb. 18b: OH*-Temperaturmessungen in Wuppertal, 1988.

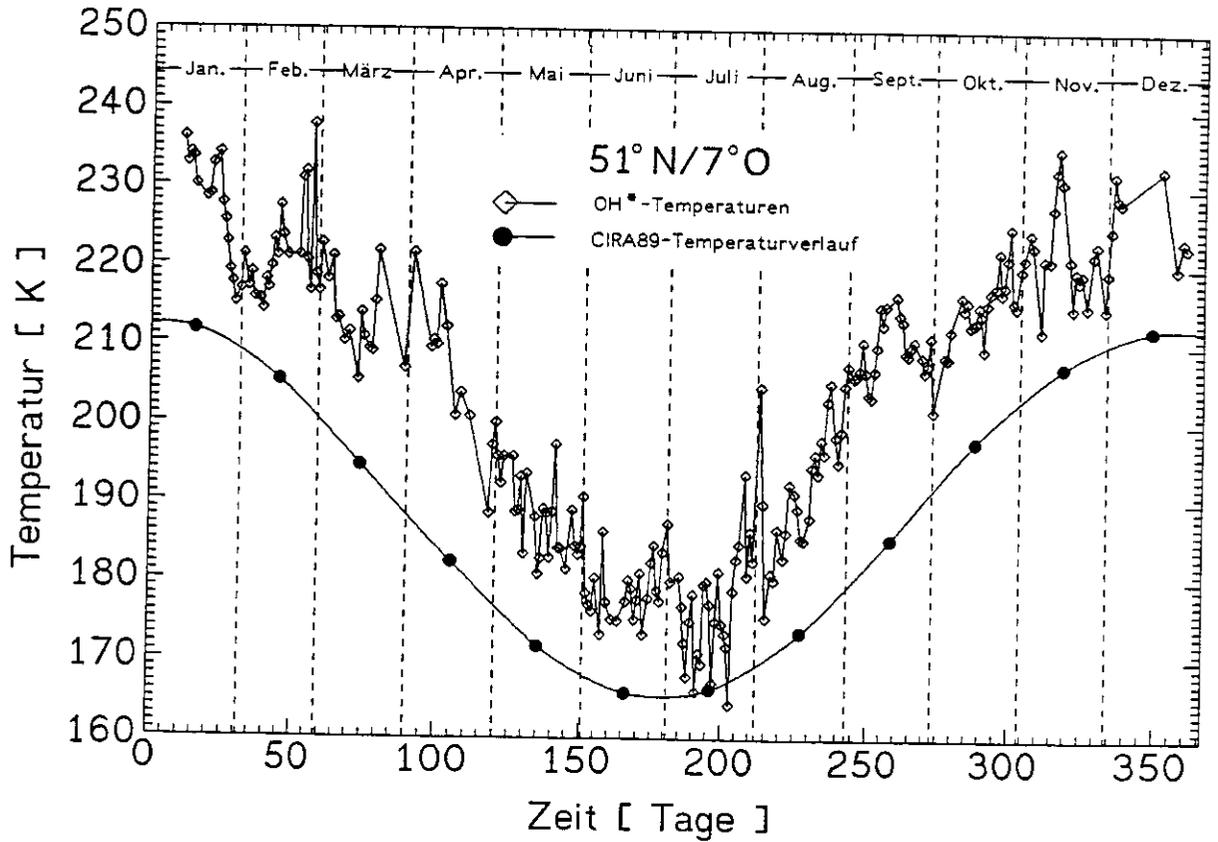


Abb. 18c: OH*-Temperaturmessungen in Wuppertal, 1989.

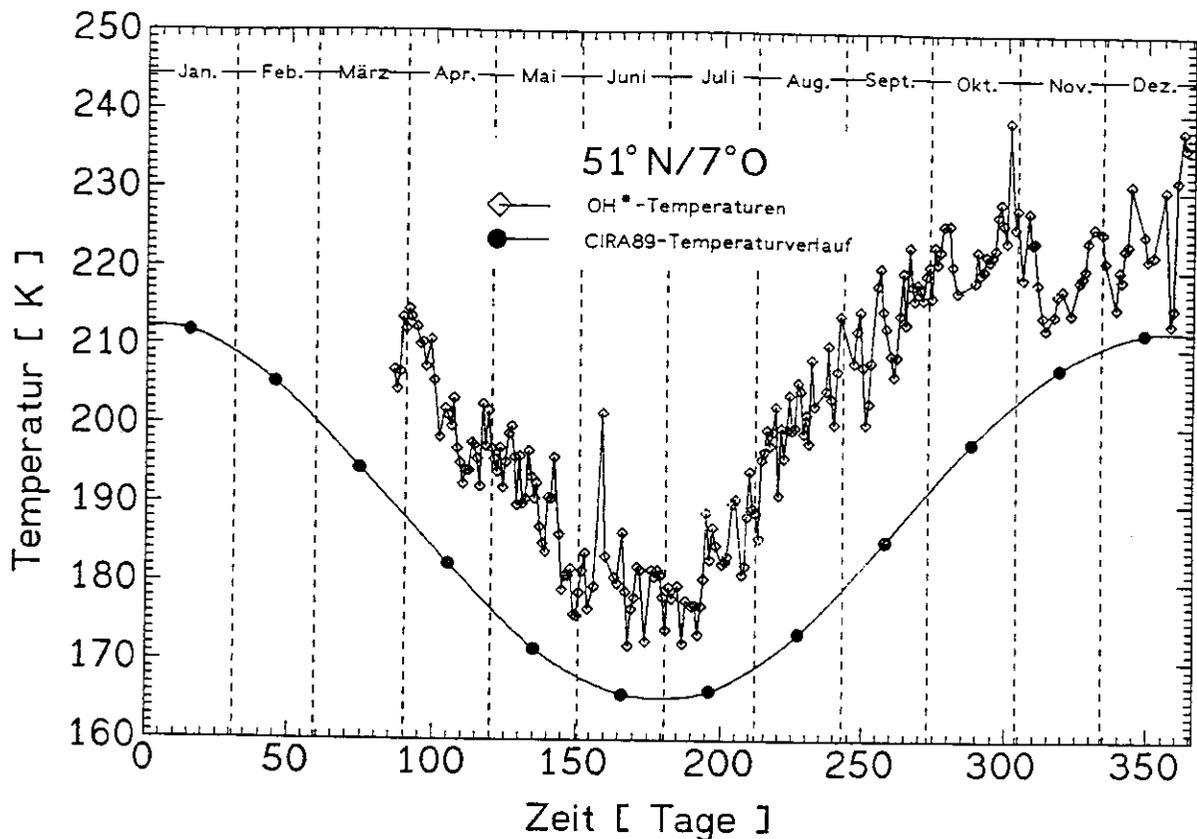


Abb. 18d: OH*-Temperaturmessungen in Wuppertal, 1990.

Nach Neuaufbau und Umrüstung des Spektrometers I auf eine rechnergesteuerte Meßwerterfassung konnte in Wuppertal von Juli 1989 an die ca. fünf Monate dauernde Interkalibrierung der Spektrometer durchgeführt werden.

Im Zeitraum von Januar bis März 1990 wurden beide Spektrometer im Rahmen der DYANA-Kampagne außerhalb Wuppertals eingesetzt. Von März 1990 an wurde Spektrometer II wieder in kontinuierlicher Messung in Wuppertal betrieben, Spektrometer I verblieb nach der DYANA-Kampagne bis Dezember 1990 zu weiteren Messungen in Frankreich, mit dem Ziel, einen kompletten Jahresgang der Mesopausentemperatur an Orten unterschiedlicher geographischer Breite und Länge zu dokumentieren.

Eine Darstellung sämtlicher mit den Spektrometern I und II im Zeitraum von 1980 bis 1990 ermittelten OH*-Temperaturen erfolgt ohne Differenzierung nach verschiedenen Orten in Abb. 19. Da eine Untergrundkorrektur der Temperaturen erst ab Juli 1989 möglich ist, werden, um einen nicht realen Bruch in der Darstellung zu vermeiden, die unkorrigierten Temperaturen benutzt.

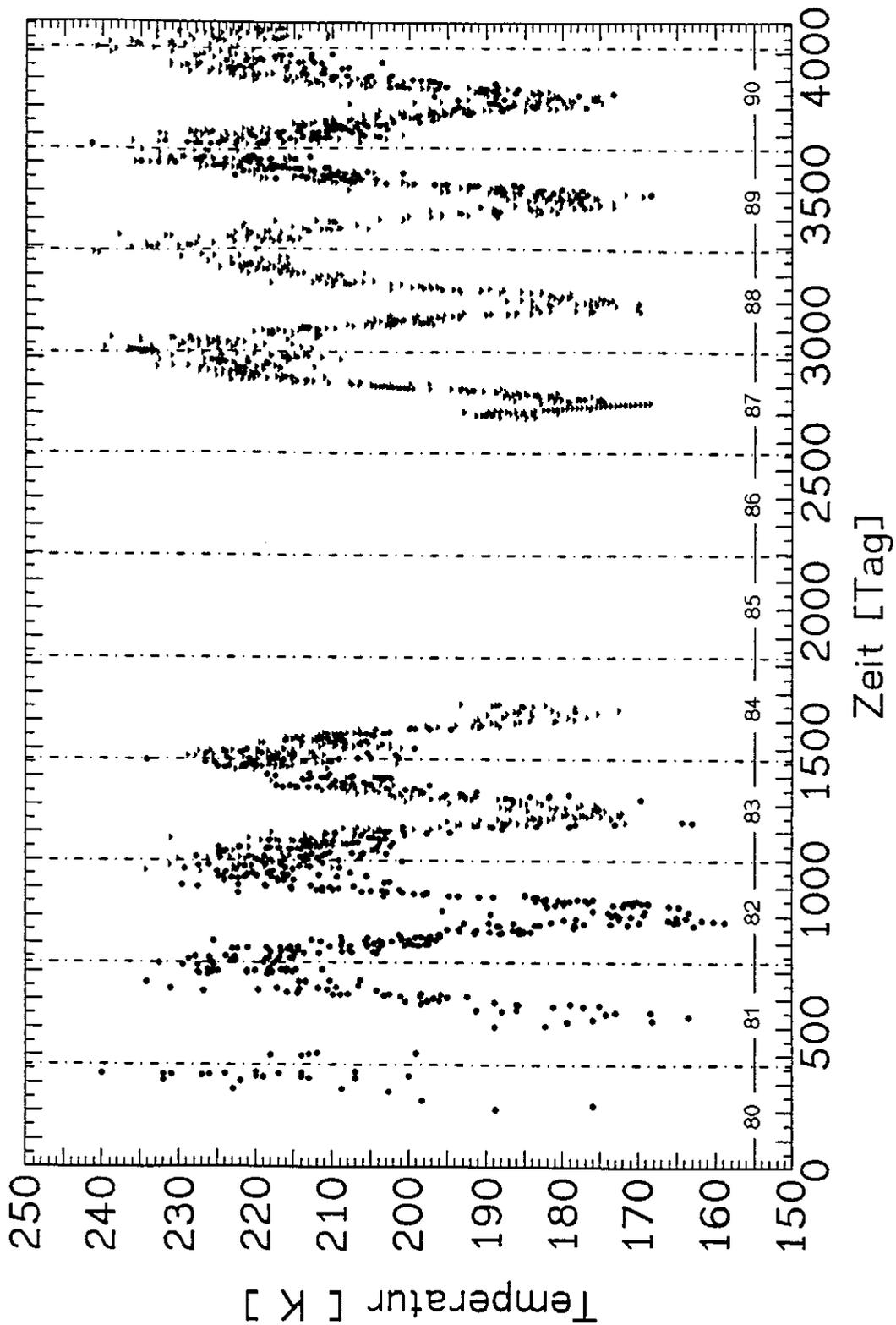


Abb. 19: Darstellung aller seit 1980 mit den Spektrometern I und II bestimmten Temperaturnachtmittelwerte.
(01.01.1980 = Tag 1)

In der Darstellung des gesamten Datensatzes (Abb. 19) und in den für die Jahre 1987-1990 ermittelten OH*-Temperaturen sind mehrere Effekte in erster Näherung erkennbar, die in den folgenden Kapiteln genauer untersucht werden:

- Die OH*-Temperaturen zeigen einen ausgeprägten Jahresgang mit niedrigen Temperaturen im Sommer und hohen Temperaturen im Winter.

- Diesem Jahresgang überlagert ist ein seit 1980 kontinuierlich verlaufender Trend zu ansteigenden Temperaturen.

- Die Temperaturdaten zeigen starke Fluktuationen, die zu unterschiedlichen Zeitabschnitten im Jahr unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Diese Fluktuationen können, sofern sie periodisch wiederkehren, ein Anzeichen für Wellenaktivität im Bereich der OH*-Schicht sein.

4.1 Langzeitvariation der OH*-Rotationstemperaturen

Die OH*-Temperaturen liefern nicht nur Informationen über die kurzzeitige Variabilität im Bereich der Mesopause, sondern zeigen auch Veränderungen an, die erst in mehrjährigen Beobachtungen deutlich werden.

Eine fünf Jahre umfassende Auswertung der mit den Wuppertaler Spektrometern im Zeitraum von 1980 bis 1984 ermittelten Temperaturdaten weist bereits auf einen Trend ansteigender OH*-Temperaturen hin (Gerndt, 1986). Als Grundlage dieser Vermutung dienen dabei OH*-Messungen, die an Orten verschiedener geographischer Breite durchgeführt wurden. Diese Messungen wurden im besagten Zeitraum in Wuppertal (51°N/7°O), Oslo (60°N/11°O), Andenes (69°N/16°O) und Esrange (68°N/21°O) durchgeführt.

Erste Erklärungsversuche der beobachteten Temperaturänderungen mit Schwankungen der solaren Aktivität führten zu keinem befriedigenden Ergebnis (Gerndt, 1986).

Eine Korrelationsanalyse der OH*-Temperaturen mit der solaren Aktivität (10.7 cm-Strahlung) und der beobachteten QBO (Quasi-Biennial Oscillation)-Phase zeigt eine negative Korrelation zwischen solarer Aktivität und gemessener OH*-Temperatur. Diese negative Korrelation kann besonders deutlich während der Ost-Wind-Phase der QBO festgestellt werden (Neumann, 1990).

Für die folgende Auswertung mehrjähriger Temperaturänderungen kann auf einen wesentlich größeren OH*-Temperaturdatensatz zurückgegriffen werden, der Zeitraum von Mai 1987 bis Februar 1991 steht zusätzlich zur Verfügung.

Dies bedeutet, daß nun OH*-Temperaturen verwendet werden können, die sowohl in Zeiten abnehmender solarer Aktivität als auch bei zunehmender solarer Aktivität gemessen wurden.

Im Zeitraum von 1980 bis 1984 wurde abnehmende solare Aktivität festgestellt, im Zeitraum von 1987 bis 1990 steigt die solare Aktivität an. Legt man die Annahme der bereits erwähnten Korrelationsanalyse (Neumann, 1990) zugrunde, müßten die OH*-Temperaturen zwischen 1987 und 1990 tendenziell abnehmen.

Bereits die grobe Darstellung aller gemessenen OH*-Temperaturen (s. Abb. 19) zeigt einen von 1980 bis 1991 kontinuierlich andauernden Anstieg der Temperaturen.

Zur genaueren Analyse dieses im Gesamtdatensatz erkennbaren Temperaturanstieges werden im folgenden ausschließlich die in Wuppertal mit beiden Spektrometern ermittelten Temperaturdaten benutzt. Durch die Beschränkung der Daten auf einen Meßort kann eine Verfälschung des Temperaturtrends durch eine mögliche vom Breitengrad abhängige Variation der OH*-Temperaturen (Breitengang) vermieden werden. Die Temperaturdaten weisen aufgrund unterschiedlicher Witterungsverhältnisse Datenlücken auf, die unregelmäßig über den Meßzeitraum verteilt sind.

Zur Beschreibung des über mehr als zehn Jahre beobachteten Temperaturverlaufs über Wuppertal werden die Temperaturen in Monatsmittelwerte zusammengefaßt. Diese Mittelwerte werden dem 15. des entsprechenden Monats zugeordnet (Abb. 20).

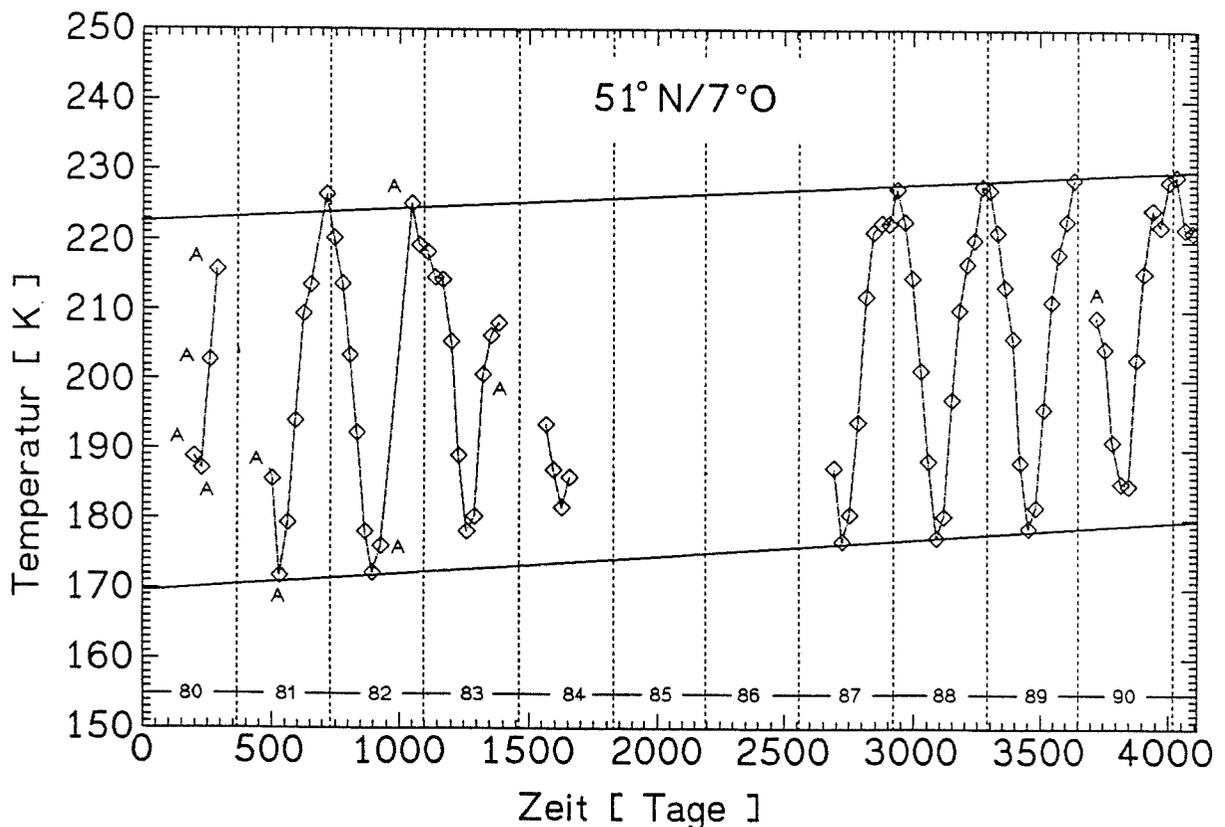


Abb. 20: Variation der OH*-Temperatur (Monatsmittel).

Die Angabe des Meßtages erfolgt ausgehend vom

01.01.1980 (Tag 1 \equiv 01.01.1980).

Monate, die durch weniger als sechs Tage dokumentiert sind, werden in dieser Darstellung mit einem "A" gekennzeichnet.

Der statistische Fehler der Monatsmittel liegt zwischen 1 und 2 K.

(Spektrometer I und II)

Deutlich erkennbar zeigt der Verlauf der Temperaturmittel den erwarteten Jahresgang der OH*-Temperaturen (Gerndt, 1986). Im Gegensatz zur Troposphäre, deren Temperaturjahresgang mit niedrigen Temperaturen im Winter und hohen Temperaturen im Sommer durch unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung bestimmt wird, ist die Ursache des Temperaturjahresgangs der OH*-Schicht mit dynamischen Änderungen im Höhenbereich von 80-95 km zu erklären. Die niedrigen Sommertemperaturen werden durch Aufwärtsbewegungen der Luft im Bereich von 80-95 km bewirkt. Diese Aufwärtsbewegungen verursachen eine Abkühlung der Mesopause durch Expansion der aufsteigenden Luftmassen, wogegen Abwärtsbewegungen die hohen Winter-Temperaturen bewirken (Geller, 1980).

In Abb. 20 deuten die beiden den Datensatz einhüllenden Geraden eine Temperaturzunahme im Bereich der OH*-Schicht an. Anhand dieser einhüllenden Geraden, die im wesentlichen den Temperaturtrend der Sommerminima bzw. der Wintermaxima widerspiegeln, deutet sich ein mittlerer Anstieg dieser Temperaturen von ca. 8-10 K/Dekade an. Der Verlauf der Geraden ist in erster Näherung parallel, so daß eine Abnahme des Temperaturunterschiedes (Temperaturhub) zwischen niedrigen Sommertemperaturen und hohen Wintertemperaturen nicht zu erwarten ist. Eine derartige Verringerung des Temperaturhubs läßt sich aus der Analyse des Gesamtdatensatzes im Zeitraum von 1980-1984 aus Wuppertal, Oslo und Esrange schließen (Gerndt, 1986).

Betrachtet man für den ausschließlich über Wuppertal ermittelten Gesamtdatensatz die Jahre, in denen sowohl die Monatsmittelwerte des Sommerminimums als auch des Wintermaximums mit mehr als sechs Temperaturen dokumentiert sind (1987-1989), so erhält man einen annähernd konstanten Temperaturhub von 50 K. Der Temperaturhub des Temperaturminimums vom Sommer 1990 zum Temperaturmaximum des Winters 1990/91 beträgt 45 K. Da die Wintertemperaturen dem durch den Temperaturtrend angedeuteten Verlauf folgen, hängt dieser niedrige Wert ausschließlich von den ungewöhnlich hohen Sommertemperaturen ab. Deshalb scheint er statistisch unrelevant zu sein. Eine Verringerung des Temperaturhubs kann hieraus nicht abgeleitet werden.

Um festzustellen, ob die angedeutete mittlere Temperaturzunahme von ca 8-10 K/Dekade in allen Monaten gleichermaßen vorhanden ist oder ob für bestimmte Monate eine Temperaturabnahme beobachtet werden kann, wird für jeden Monat separat eine Analyse des Temperaturtrends durchgeführt (s. Abb. 21). Bei der Untersuchung des vermuteten Temperaturtrends über mehrere Jahre hinweg werden ausschließlich gut dokumentierte Monate, d.h. Monate, die mit mehr als sechs Temperaturdaten dokumentiert sind, berücksichtigt.

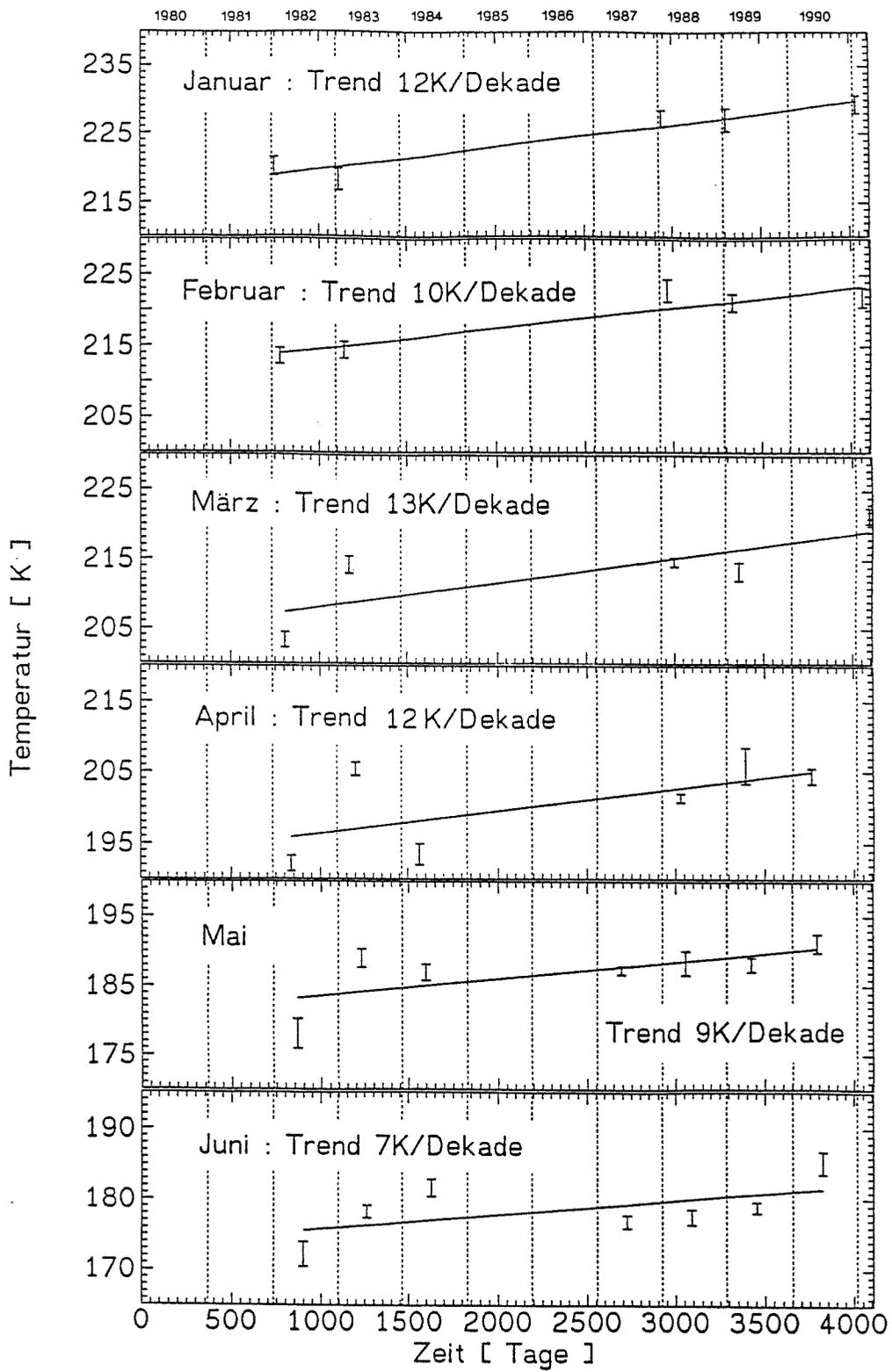


Abb. 21a: Trendanalyse der Monate Januar bis Juni.

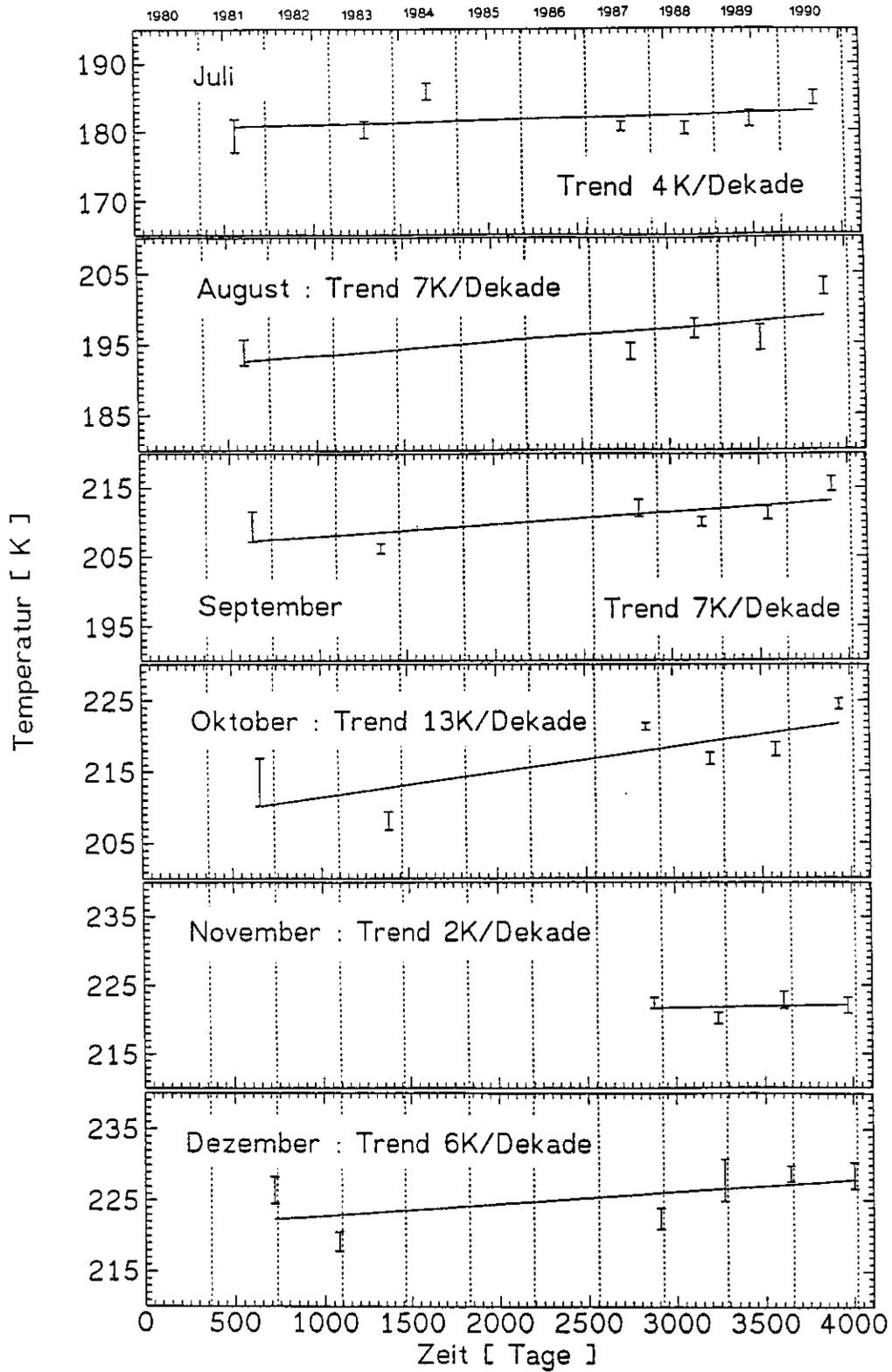


Abb. 21b: Trendanalyse der Monate Juli bis Dezember. Die Temperaturdaten entsprechen den Monatsmittelwerten. Angegeben wird der statistische Fehler der Monatsmittel (01.01.1980 \equiv Tag 1).

Die Trendanalyse erfolgt mittels linearer Regression der Temperaturmittelwerte.

Tab. 3: Temperaturzunahme im Bereich der OH*-Schicht, abgeleitet aus OH*-Rotationstemperaturen im Zeitraum von 1980 bis 1991.

Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
12	10	13	12	9	7
Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
4	7	7	13	2	6

Erläuterung zu Tabelle 3 :

Die Angaben beschreiben den mittleren Temperaturanstieg [K] pro Dekade.

Es stellt sich für alle Monate ein konsistentes Bild ansteigender Temperaturen ein. Die Trendwerte der einzelnen Monate deuten auf einen höheren Temperaturanstieg im Bereich des Wintermaximums hin. Im Jahresmittel zeichnet sich ein Anstieg der OH*-Temperaturen von ca. 8.5 K/Dekade ab.

Weiterhin wird die gemessene OH*-Temperatur mit dem Temperaturverlauf der CIRA89-Modellatmosphäre für eine Höhe von 86 km verglichen (s. Abb. 22).

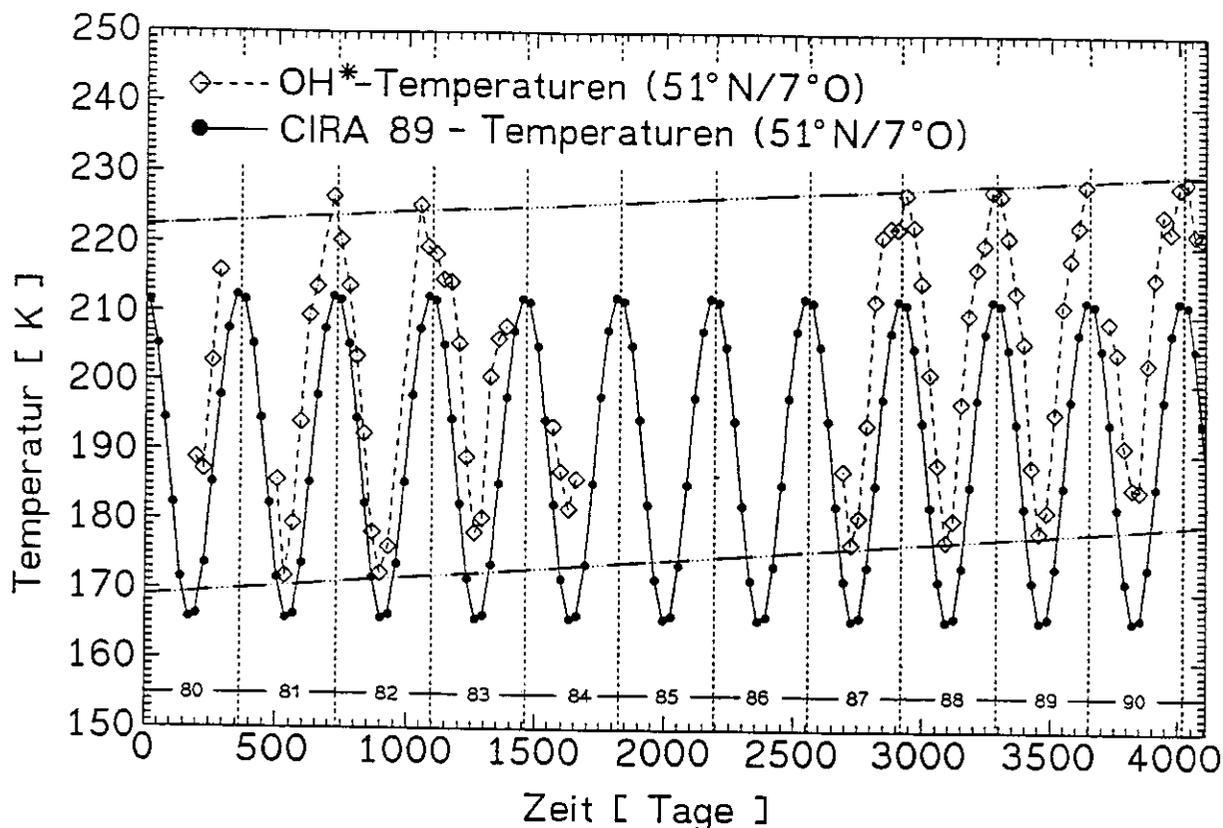


Abb. 22: Vergleich der von der CIRA89-Modellatmosphäre (86 km Höhe) angegebenen Temperaturmonatsmittel mit den Monatsmittelwerten der OH*-Temperaturen. (01.01.1980 = Tag 1)

Der Vergleich der Meßwerte mit den Modell-Temperaturen zeigt deutlich, daß der Jahresgang der OH*-Temperatur im wesentlichen durch das Modell wiedergegeben wird. Der Temperaturhub zwischen Wintermaximum und Sommerminimum wird von der Modellatmosphäre mit 46 K angegeben, er entspricht somit in seiner Größenordnung dem OH*-Temperaturhub von ca. 50 K.

Klar erkennbar ist auch eine von 1980 bis 1991 ständig wachsende Differenz zwischen Modell- und OH*-Temperatur. Diese wachsende Differenz geht auf den Anstieg der OH*-Temperaturen zurück. Dieser Trend kann offensichtlich von dem Atmosphären-Modell nicht beschrieben werden.

Die geringere Abweichung zwischen Modell- und OH*-Temperatur zu Beginn der OH*-Messungen ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß das benutzte Atmosphären-Modell ein empirisches Modell ist.

Die Temperaturwerte des Atmosphären-Modells werden aus einer großen Anzahl von Messungen mit verschiedenen Meßmethoden in den entsprechenden Höhenbereichen ermittelt. Aus diesem Grund kann man derartige Modell-Temperaturen als eine Art Gedächtnis der Atmosphäre bezeichnen. Dieses "Gedächtnis" spiegelt unter Umständen Situationen wider, die vor mehr als zehn Jahren beobachtet wurden.

Auch Hauchecorne et al. (im Druck) beschreiben im Zeitraum von 1984 bis 1989 für eine Höhe von 87 km um bis zu 18 K höhere Temperaturen als die Modellatmosphäre CIRA86, die im fraglichen Höhenbereich mit der CIRA89 übereinstimmt.

Da der Jahresgang der OH*-Temperatur durch das Modell prinzipiell wiedergegeben wird, kann die Modell-Temperatur benutzt werden, um die Auswirkungen des dominanten Jahresgangs auf die Analyse des Temperaturtrends zu verringern. Durch Berechnung der Temperaturabweichung zwischen OH*- und Modell-Temperatur erhält man einen Datensatz, der deutlich den zuvor angedeuteten Trend ansteigender Temperaturen zeigt.

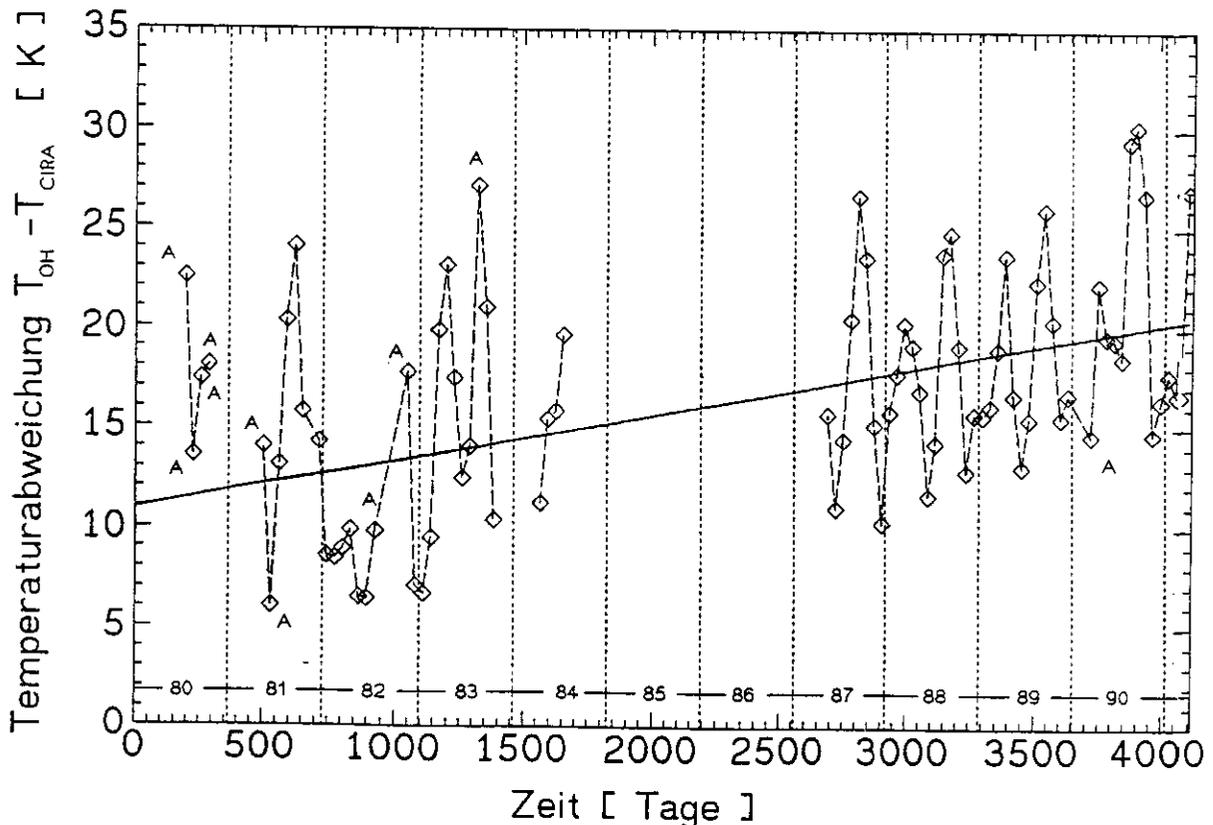


Abb. 23: Temperaturabweichung zwischen den Monatsmittelwerten der OH*-Temperaturen und der CIRA89-Modelltemperatur (86 km Höhe).

Abbildung 23 legt nahe, daß für 86 km Höhe 10 bis 20 K zu niedrige Temperaturen durch die CIRA89 angegeben werden. Erkennbar ist auch eine ca. 5 K zu geringe Amplitude des CIRA89-Jahresgangs.

Die Trendanalyse erfolgt durch lineare Regression der Temperaturabweichung. Bei dieser Analyse werden ausschließlich die Monate betrachtet, die mit mehr als sechs Temperaturnachtmittelwerten dokumentiert sind. Sie ergibt eine Temperaturzunahme von 8.5 K/Dekade, was den zuvor anhand der monatlichen Temperaturzunahme bestimmten 8.5 K/Dekade entspricht.

Da eine solche Temperaturzunahme im Höhenbereich der OH^{*}-Schicht sowohl bei ab- als auch bei zunehmender solarer Aktivität auftritt, ist sie nicht mit einer direkten Koppelung der Mesosphärentemperatur an die solare Aktivität erklärbar.

Ein derartiger über mehrere Jahre beobachtbarer kontinuierlicher Temperaturanstieg deutet hingegen auf eine langsame Änderung der Spurengaszusammensetzung der Atmosphäre und damit verbunden auf eine kontinuierliche Veränderung des Energiehaushaltes im betrachteten Höhenbereich hin.

Ähnliche über mehrere Jahre beobachtete Temperaturtrends sind für den Höhenbereich der Stratosphäre von verschiedenen Autoren in Veröffentlichungen beschrieben worden. Labitzke et. al (1986) zeigen für nördliche Breiten (40°-70°) im Zeitraum von 1966 bis 1980 einen Temperaturtrend auf, der einer Abkühlung der Stratosphäre (in 24 km Höhe) von 0.24 K/Dekade entspricht. Es wird vermutet, daß diese Temperaturabnahme auf Veränderungen der Spurengaszusammensetzung der Atmosphäre, speziell auf den Anstieg der CO₂-Konzentration in Troposphäre und Stratosphäre, zurückzuführen ist.

Analysen von Satellitendaten (SSU 47X) der Jahre 1980 bis 1990 deuten für den Höhenbereich der unteren Mesosphäre (55 km) ebenfalls eine Abkühlung von 3.5 K/Dekade an (Aikin et al., 1991).

Beobachtungen der Reflexionshöhe von Radiowellen zeigen für den Zeitraum von 1962 bis 1987 in ca. 80 km Höhe eine Abnahme des Luftdrucks um 10 %. Diese Druckabnahme deutet eine Temperaturabnahme der Mesosphäre an (Taubenheim et al., 1990).

Roble und Dickinson (1989) geben für Modellrechnungen, die eine Verdopplung des CO₂- und CH₄-Gehalts der Mesosphäre simulieren, eine Temperaturabnahme in diesem Höhenbereich von ca. 10 K an. Sie erklären diese mit der bei ansteigender CO₂-Konzentration vergrößerten Strahlungskühlung durch CO₂. Dies ist offenbar nicht in Übereinstimmung mit den vorliegenden Messungen.

Betrachtet man die von mehreren Autoren im Bereich der Stratosphäre beschriebene Temperaturabnahme in Verbindung mit der beobachteten Zunahme der CO₂-Konzentration und geht man von der bekannten Antikorrelation von Stratosphären- und Mesopausentemperatur aus, liegt für die Temperaturzunahme im Bereich der OH*-Schicht die Vermutung nahe, daß der beobachtete Temperaturanstieg auf einen indirekten, über Dynamik vermittelten Klimaeffekt im Bereich der OH*-Schicht hinweist.

Da der direkte Einfluß des solaren Zyklus auf das Temperaturverhalten im Bereich der OH*-Schicht (Neumann, 1990) in dem vorliegenden Datensatz nicht deutlich wird, ist zu vermuten, daß der beobachtete Temperaturtrend um ein Vielfaches höher ist als der Einfluß des solaren Zyklus auf die Temperaturen im Bereich der OH*-Schicht.

4.2 Jährliche Änderungen der Wellenaktivität

Die in den Abb. 18a-d erkennbare Variabilität der nächtlichen Temperaturmittel kann mit dem Auftreten periodischer Variationen erklärt werden. Detaillierte Analysen der OH*-Temperaturen im Zeitraum von 1980-1984 führen in Verbindung mit Ergebnissen anderer Messungen zu der Annahme, daß diese Variationen auf planetaren Wellen basieren (Gerndt, 1986) könnten. Bedingt durch die relativ geringe Anzahl von Meßwerten konnten die ermittelten Ergebnisse nur andeutungsweise interpretiert werden. Festgestellt wurde dabei eine Abhängigkeit der Periodendauern von der Jahreszeit. Es zeigte sich, daß im Winter die langperiodischen (länger als zehn Tage), im Sommer die kurzperiodischen Komponenten (kürzer als sechs Tage) überwiegen.

Zur näheren Untersuchung dieser Annahme und möglicher klimatologischer Effekte wird der erweiterte Datensatz mit dem Instrumentarium einer von Bloomfield (1976) detailliert beschriebenen und von Gerndt (1986) zur Analyse der OH*-Datensätze modifizierten FFT-Analyse (Fast-Fourier-Transformation) untersucht. Mit klimatologischen Effekten sind hierbei Korrelationen zwischen der Häufigkeiten der verschiedenen Periodendauern und dem Meßzeitpunkt (Jahreszeit) gemeint.

Diese Häufigkeiten werden wie folgt bestimmt:

- Die FFT-Analyse wird für den gesamten zur Verfügung stehenden Datensatz mit einem 30 Tage umfassenden Auswertungsfenster durchgeführt. Dieses Fenster wird mit einer Schrittweite von 5 Tagen über den Datensatz geschoben.

- Dem jeweils mittleren Tag eines Datenfensters werden die so berechneten relativen spektralen Dichten der einzelnen Perioden zugeordnet.
- Bei der weiteren Betrachtung werden ausschließlich Perioden berücksichtigt, deren relative spektrale Dichte oberhalb eines zuvor festgelegten Grenzwertes liegt. Hierdurch werden Einflüsse durch Rauschen oder die Länge des Analysefensters auf die Bestimmung der Periodizitäten unterdrückt. Zur Bestimmung des Grenzwertes wird dem OH*-Temperaturjahresgang ein künstlich erzeugtes Rauschspektrum überlagert. Die Amplitude des Rauschspektrums beträgt ± 2.5 K (maximaler Fehler der OH*-Nachtmittelwerte). Um eine möglichst große Ähnlichkeit mit den realen Datensätzen zu gewährleisten, wurden auch die auftretenden Datenlücken simuliert. Der mit synthetischem Rauschen überlagerte Temperaturverlauf wurde der bereits erwähnten FFT-Analyse unterzogen. Die Datenfenster wurden hierbei wie oben aufgeführt gewählt. Alle berechneten relativen spektralen Dichten waren ≤ 4 [rel. Einheit]. Deshalb wurde der Schwellenwert der FFT-Analyse auf einen Wert von 8 [rel. Einheit] festgelegt (Für Beispiele derartiger Spektralanalysen siehe Abb. 30).
- Perioden, die obige Bedingung erfüllen, wird der Wert $H=1$ (\equiv im betrachteten Fenster vorhanden) zugeordnet und für jeden Analysemonat die Summe dieser Werte bestimmt.
- Ausgehend von der Anzahl der Datenfenster für den jeweiligen Monat wird bestimmt, wie häufig die einzelnen Perioden prozentual auftreten. Einer Periode, die in allen Fenstern eines Monats auftritt, wird eine 100-prozentige Häufigkeit in diesem Monat zugeordnet.
- Analog hierzu wird die Verteilung der Häufigkeit pro Monat in den mehrere Jahre umfassenden Analysezeiträumen bestimmt. Die Analysezeiträume umfassen zum einen die Jahre 1981 bis 1983, zum anderen die gesamte Meßzeit (1981 - 1983, 1987 - 1991).
- Die Analyse der Jahre 1981 bis 1983 umfaßt Messungen in Oslo und Wuppertal. Die berücksichtigten Messungen zwischen 1987 und 1991 wurden ausschließlich in Wuppertal durchgeführt.
- Die Häufigkeiten sind in Tabellen 4 und 5 aufgeführt und in den Abbildungen 24 und 25 graphisch dargestellt.

Tab. 4: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981 - Oktober 1983.

Monat	Periodendauer [Tage]						Anzahl der analysierten Jahre
	10.7	8.0	6.4	5.3	4.6	4.0	
Januar	50	28	6				3
Februar	17	39	17	11			3
März	39	39	17	11			3
April	17	11	6				3
Mai	50	33	17	25	25	33	2
Juni	12	13	7	43	12		3
Juli	25			42			2
August		6	33				3
September	25	6	31		8	6	3
Oktober	17			8			2
November	33	33	17				1
Dezember	41	33		7			3

Tab. 5: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981 - Oktober 1983, Mai 1987 - Dezember 1989 und April 1990 - Februar 1991.

Monat	Periodendauer [Tage]						Anzahl der analysierten Jahre
	10.7	8.0	6.4	5.3	4.6	4.0	
Januar	58	22	6		3		6
Februar	32	36	11	6	3		6
März	37	23	13	10			5
April	19	6	3	3			6
Mai	26	32	10	22	13	13	5
Juni	15	6	8	19	17	5	7
Juli	11	8	25	22	6		6
August	4	4	18	7	5		7
September	32	7	23		4	2	7
Oktober	16	2		3			6
November	47	7	3	3			5
Dezember	59	30	12	5			7

Erläuterung zu den Tabellen 4 und 5 sowie zu Abbildungen 24 und 25:

Bedingt durch den Auswertungsmechanismus entsprechen die Periodendauern den diskreten Fourierperioden der verwendeten FFT-Analyse. Sie geben somit nur den qualitativen Verlauf der beobachtbaren periodischen Temperaturänderungen im Bereich der OH*-Schicht wieder.

Aufgeführt werden die im Analysefenster auflösbaren Fourierperioden; die Nachkommastellen sind kein Maß für die Genauigkeit der Periodendauern. Die Genauigkeit ist vielmehr von der Dichte der diskreten Fourierperioden abhängig. So besitzt z.B. die Angabe der prozentualen Häufigkeit für die 10.7 Tage-Periode eine Genauigkeit von $+2.5/-1$ Tagen. Dieser Genauigkeitsbereich ergibt sich aus der Lage der Stützstellen der FFT-Analyse: Die nächst höhere Stützstelle liegt bei 16, die nächsttiefere bei 8 Tagen Periodendauer.

Wie Abbildungen 24 und 25 verdeutlichen, überwiegen während der Sommermonate kurze Periodendauern (zwischen 4 und 7 Tagen). Im Winter sind lange Perioden (ab 8 Tagen) vorherrschend. Dieser Zusammenhang wird in den Abbildungen durch die gestrichelten Linien angedeutet.

Der beobachtete Zusammenhang zeigt sich sowohl bei der Betrachtung des von 1981 bis 1983 reichenden Intervalls als auch bei der Analyse des gesamten Datensatzes.

Diese Analysen bestätigen die bereits oben erwähnte, von Gerndt aufgestellte Vermutung bezüglich des Vorherrschens bestimmter Periodendauern in den verschiedenen Jahreszeiten. Dies deutet darauf hin, daß sich in der Mesosphäre sowohl in den Sommer- als auch in den Wintermonaten wiederkehrende dynamische Bedingungen einstellen, die zu den beobachteten langperiodischen Oszillationen führen.

Spektralanalysen von periodischen Variationen des Zonal- und Meridionalwindes in 80 und 90 km Höhe zeigen ähnliche Resultate. Im Sommer sind Perioden ≤ 5 Tagen und im Winter > 5 Tagen vorherrschend (Manson und Meek, 1986).

Unsere Analyse zeigt sowohl wiederkehrende langperiodische Temperaturvariationen im Winter als auch kurzperiodische Effekte im Sommer, die bei der Aufstellung neuer Atmosphärenmodelle berücksichtigt werden sollten.

Die in der vorliegenden Analyse festgestellten Perioden von 4 bis 7 und von > 8 Tagen liegen in der Größenordnung der planetaren 5-, 9- und 16-Tage-Welle. Ob die beobachteten periodischen Variationen durch planetare Wellen verursacht werden, kann durch Analyse der Temperaturvariation an einem einzigen Ort nicht belegt werden.

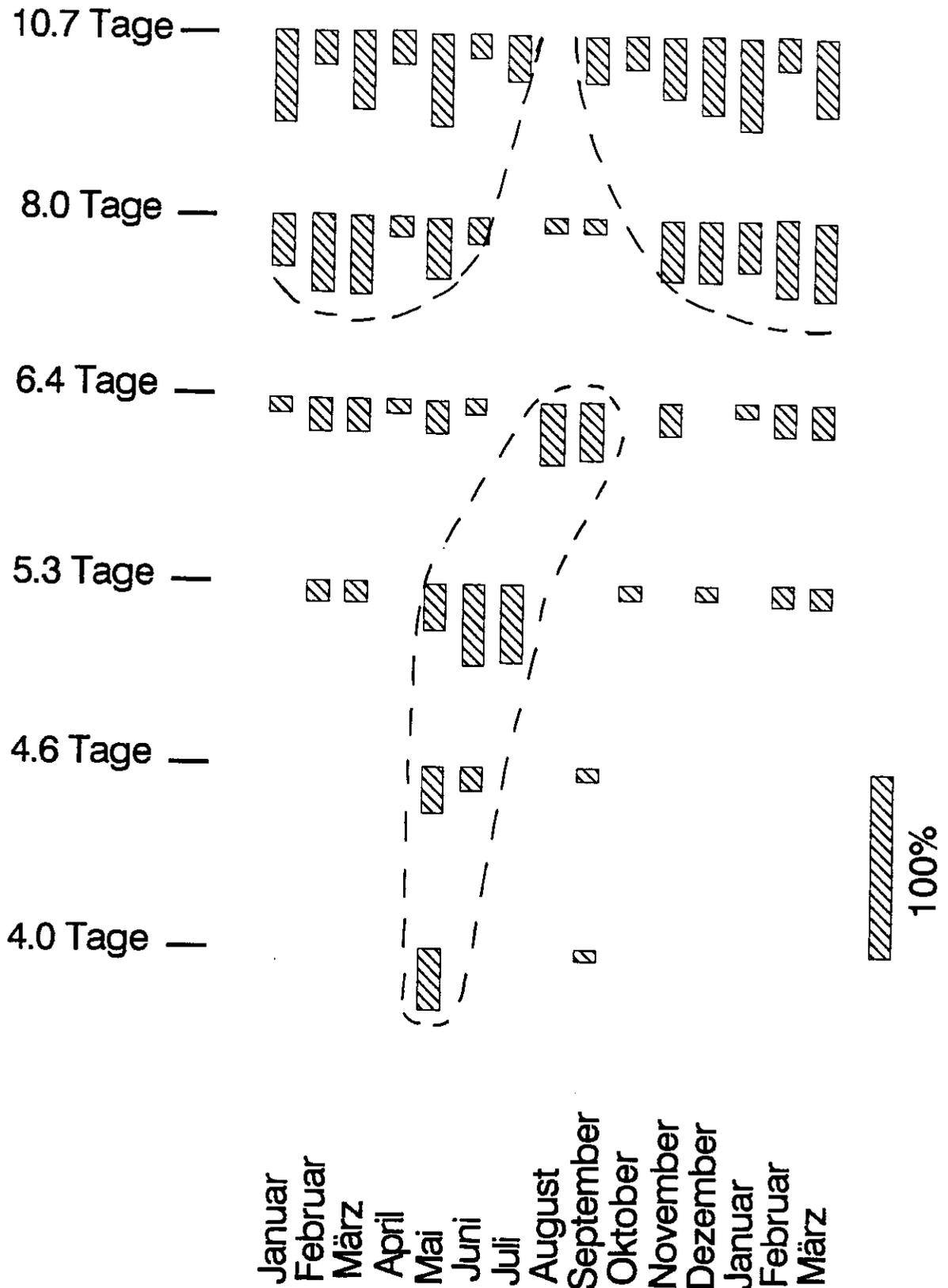


Abb. 24: Prozentuale Häufigkeit der in der OH*-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983.

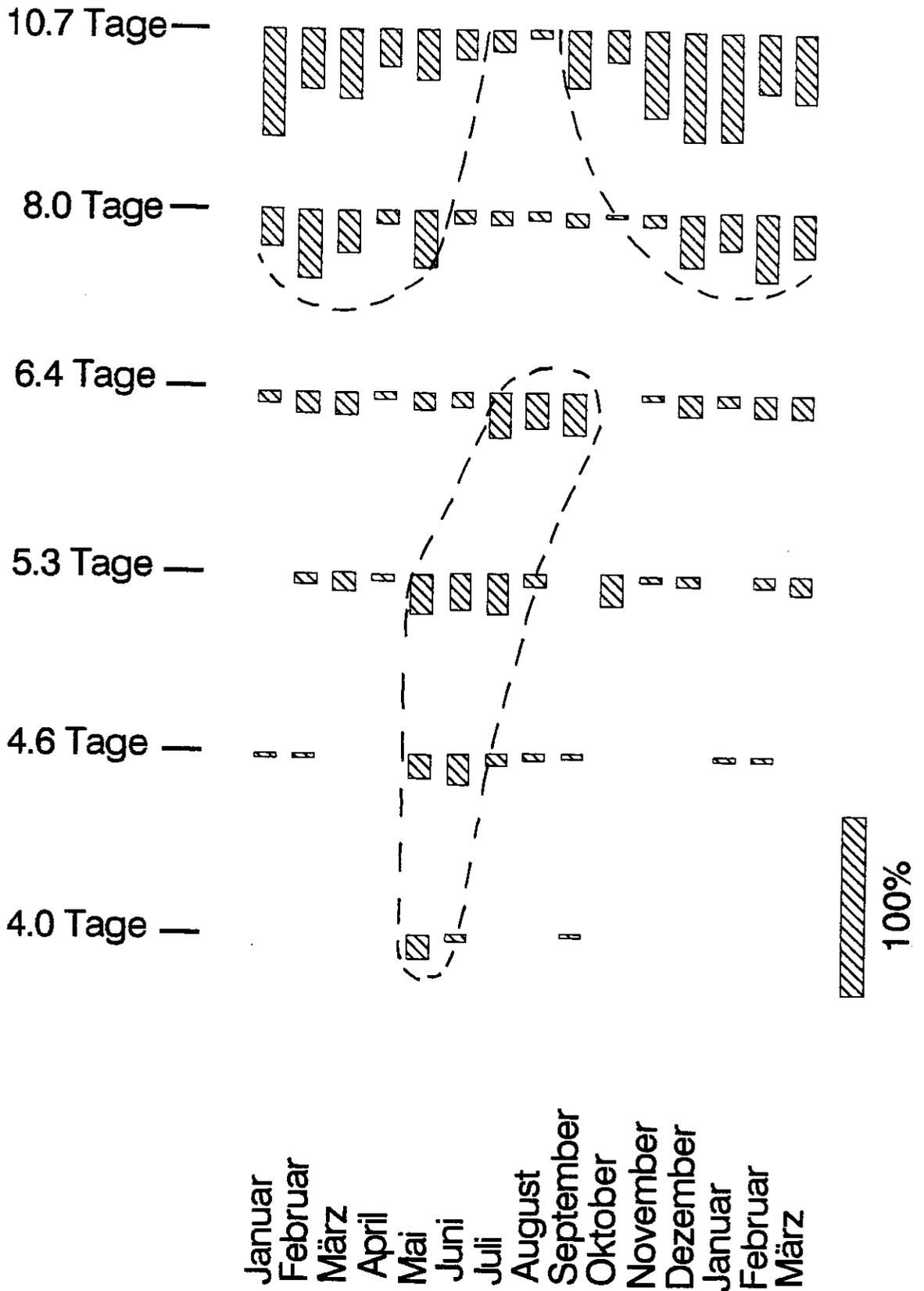


Abb. 25: Prozentuale Häufigkeit der in der OH⁺-Temperaturvariabilität beobachtbaren Perioden, Juni 1981-Oktober 1983, Mai 1987-Dezember 1989 und April 1990-Februar 1991.

4.3 Vergleich der OH*-Temperaturverläufe in Biscarosse (Frankreich) und Wuppertal (Deutschland)

Zwischen dem 15.01. und dem 03.12.1990 wurde Spektrometer I kontinuierlich in Biscarosse, Frankreich (44°N/1°W), Spektrometer II ab dem 27. März 1990 in Wuppertal im Rahmen einer Vergleichsmessung betrieben. Ziel dieser Messungen war ein Vergleich der Temperaturverläufe an Orten unterschiedlicher geographischer Breite und Länge. Schwerpunkt der Untersuchung bildet hierbei die Beschreibung eines eventuellen Breitenganges der OH*-Temperatur.

Um mögliche Verfälschungen durch in das Gesichtsfeld gestreute Störstrahlungen zu vermeiden, wurde Spektrometer I so installiert, daß das Gesichtsfeld ausschließlich über dem Meer liegende Bereiche umfaßte. Im gesamten Meßzeitraum ergaben sich keinerlei Anhaltspunkte für Störungen dieser Messungen durch Streulicht.

Da sich Störeinflüsse, wie bereits in Kap. 2.3 und 3.6 beschrieben, in Wuppertal nicht vermeiden lassen, werden für den Vergleich aus Wuppertal untergrundkorrigierte Temperaturen verwendet.

Die ermittelten Temperaturen sowie die entsprechende CIRA89-Modelltemperaturen werden in Abbildung 26a und 26b dargestellt.

Klar erkennbar ist die Tatsache, daß die Datenrate in Biscarosse wesentlich geringer ist als in Wuppertal, was nicht auf die vorherrschenden Wetterbedingungen, sondern auf die Arbeitszeit der Bediener zurückzuführen ist (das Gerät wurde fast ausschließlich an Wochentagen betrieben). Für die Angabe der Jahresgänge wird aus diesem Grund wiederum auf die Monatsmittelwerte zurückgegriffen. Auch diese werden im Vergleich mit der jeweiligen CIRA89-Temperatur graphisch dargestellt (Abb. 27a und 27b).

Der statistische Fehler bei der Berechnung der Monatsmittelwerte beträgt für beide Meßorte 1-2 K.

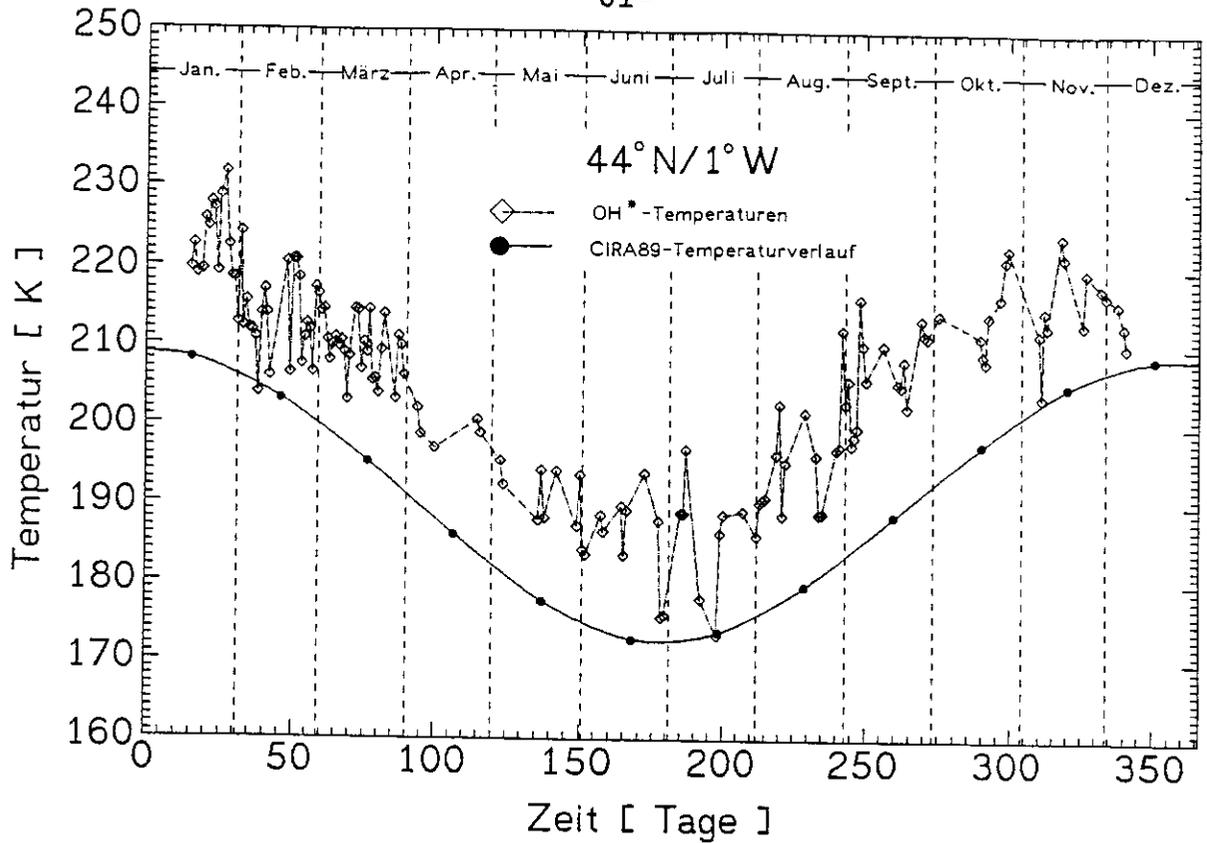


Abb. 26a: Temperaturverlauf in Biscarosse im Vergleich zu der CIRA89-Modelltemperatur in 86 km Höhe.

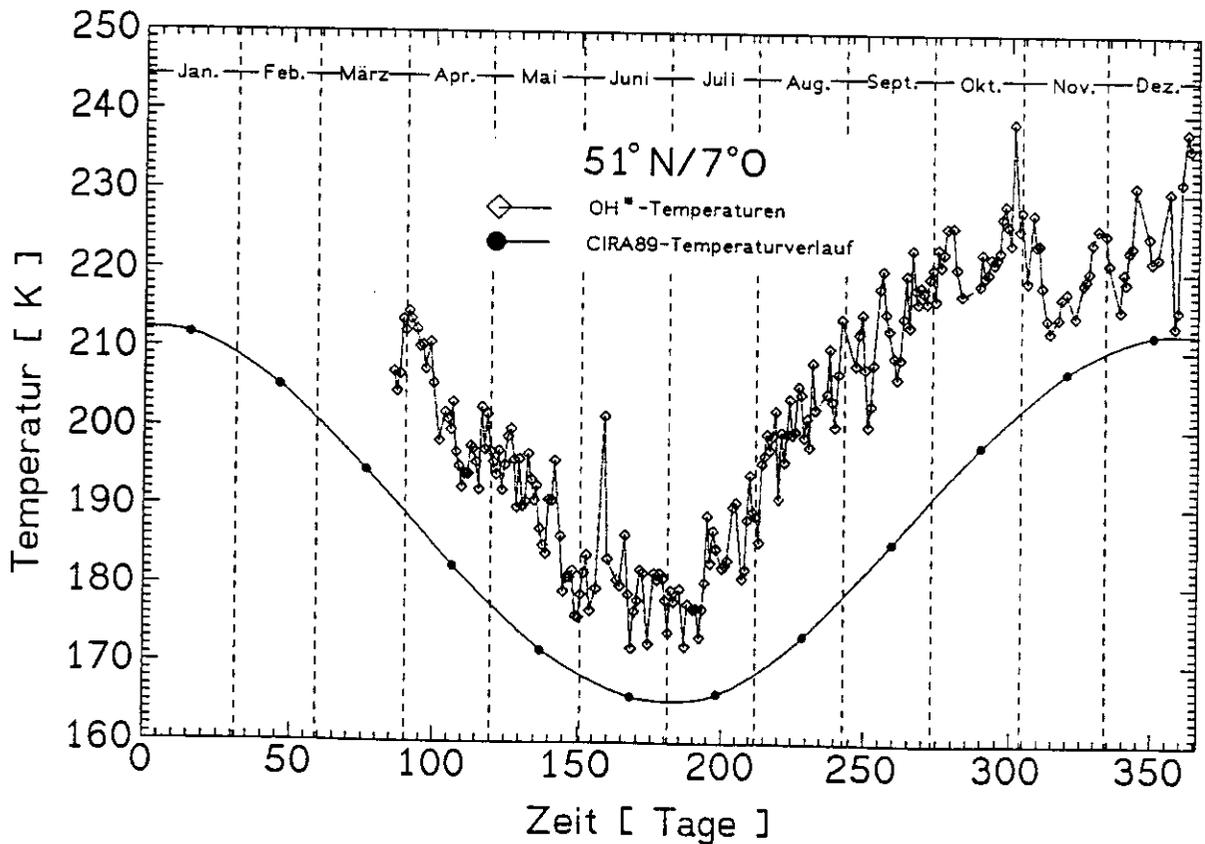


Abb. 26b: Temperaturverlauf in Wuppertal im Vergleich zu der CIRA89-Modelltemperatur in 86 km Höhe.

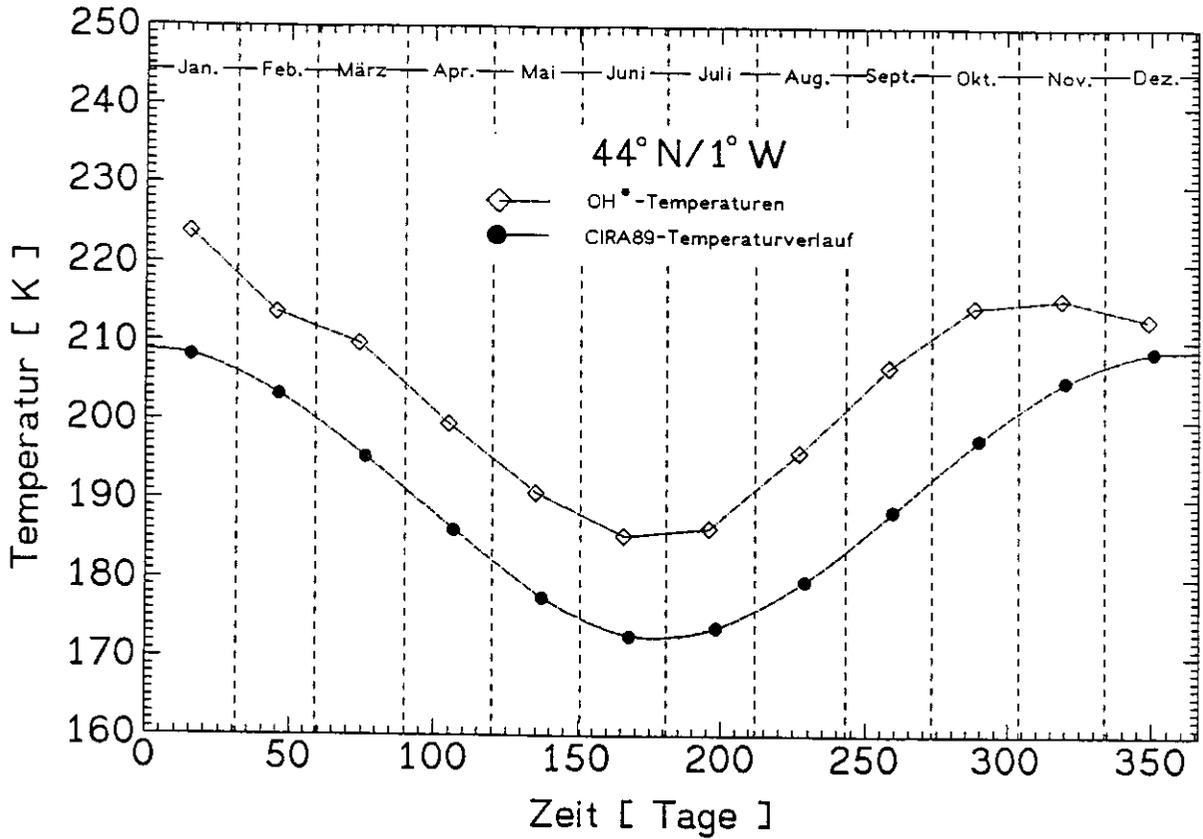


Abb. 27a: Verlauf der Monatsmittel in Biscarosse im Vergleich zu der CIRA89-Modelltemperatur in 86 km Höhe.

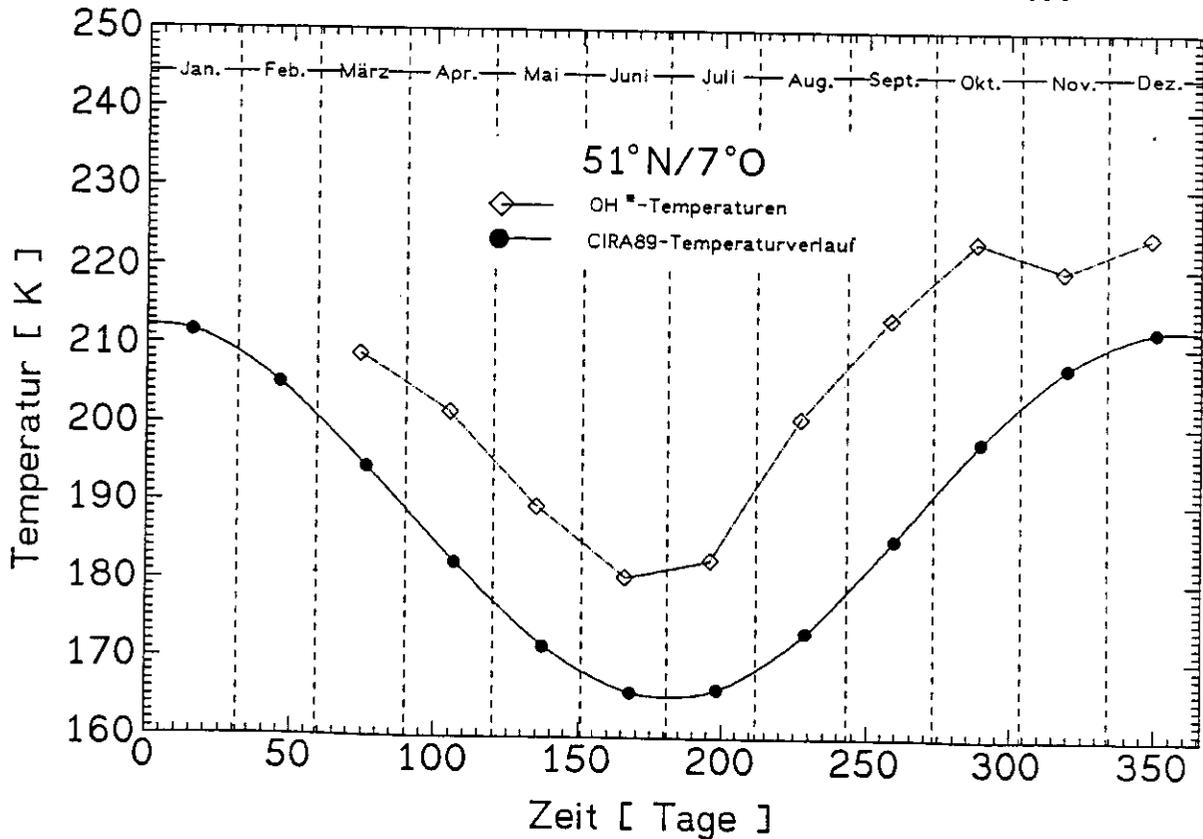


Abb. 27b: Verlauf der Monatsmittel in Wuppertal im Vergleich zu der CIRA89-Modelltemperatur in 86 km Höhe.

Wie aus den Abbildungen der Monatsmittelwerte ersichtlich ist, wird der Verlauf der OH*-Temperatur durch die Atmosphärenmodelle qualitativ gut beschrieben.

An beiden Meßorten ergibt sich jedoch eine signifikante Verschiebung der OH*-Temperaturen zu höheren Werten. Die in Biscarosse ermittelten Werte liegen durchschnittlich um 14 K über den von dem CIRA89-Modell vorausgesagten Temperaturen, wogegen die Wuppertaler Temperaturen eine mittlere Abweichung von 19 K nach oben aufweisen. Der gravierendste Unterschied zwischen den beiden Meßorten zeichnet sich bei der Betrachtung der Verläufe der Monatsmittelwerte im Herbst ab: Während auch im Herbst und im Winter der Verlauf der OH*-Temperaturen für Biscarosse durch die CIRA89-Temperaturen gut widergespiegelt wird (annähernd konstante Temperaturabweichung), ergeben sich hier für die Werte aus Wuppertal unterschiedlich große Abweichungen (die Abweichungen betragen im Frühjahr/Sommer durchschnittlich 17 K, im Herbst/Winter 21 K).

Die grundsätzlich gegenüber dem CIRA89-Modell erhöhten OH*-Temperaturen dürften auf den bereits in Kapitel 4.1 beschriebenen Trend zurückzuführen sein, wogegen die erhöhten Abweichungen im Herbst/Winter in Wuppertal weiterer Klärung bedürfen. Es liegt die Vermutung nahe, daß diese Abweichung durch im CIRA89-Modell nicht berücksichtigte Wellenphänomene hervorgerufen wird.

In Abbildung 28 sind zur Ermittlung des möglichen Breitenganges die Temperaturdifferenzen sowohl der OH*-Monatsmittel als auch der CIRA89-Temperaturen aufgetragen. Die Differenz ergibt sich durch Subtraktion der Wuppertaler von den Biscarosse-Daten.

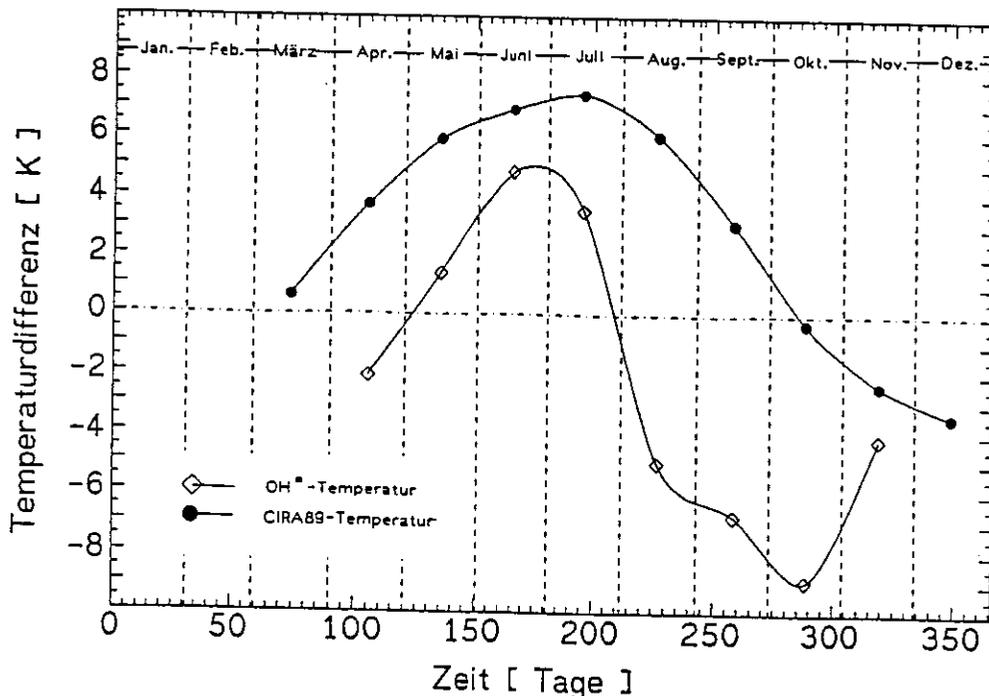


Abb. 28: Temperaturdifferenzen zwischen Wuppertal und Biscarosse.

Der von der Modellatmosphäre prognostizierte Breitengang wird durch die Messungen qualitativ bestätigt. In den Sommermonaten liegen die Temperaturen in Biscarosse über denen in Wuppertal, eine Tendenz, die sich im Winter umkehrt. Dieser Breitengang ist deutlich an den um bis zu 4 K höheren Temperaturen in Biscarosse (Sommer) und den maximal 8 K niedrigeren Wintertemperaturen (Biscarosse) erkennbar. Da es sich bei den verwendeten Werten bereits um gemittelte Daten handelt, können einzelne Differenzen wesentlich größer sein.

4.4 DYANA: Vergleich der Temperaturoszillationen an drei europäischen Meßstationen (Spanien/Frankreich/Norwegen)

Während der DYANA-Kampagne bot sich die Möglichkeit, zeitlich hoch aufgelöste Messungen der OH*-Temperatur an verschiedenen Orten gleichzeitig durchzuführen. Die vorliegende Arbeit analysiert Messungen aus Andoya (Norwegen, 69°N/16°O), Biscarosse (Frankreich, 44°N/1°W) und El Arenosillo (Spanien, 37°N/6°W) im Hinblick auf die horizontale Kohärenz von Temperaturoszillationen.

Hierbei wird untersucht, ob periodische Temperaturvariationen an allen betrachteten Meßorten feststellbar sind und inwieweit diese übereinstimmen.

Die Messungen in Biscarosse wurden mit Spektrometer I, die Messungen in Andoya mit Spektrometer II durchgeführt. An beiden Meßorten ist eine Beeinflussung durch Streulicht nicht feststellbar. Für die Messungen in El Arenosillo wurde ein Tilting-Filter-Photometer (Scheer und Reisin, 1989) verwendet. Die OH*-Temperaturen wurden hier aus Strahlungsübergängen der OH*(8,5)-Bande bestimmt.

Verglichen werden zunächst die Temperaturverläufe der Nachtmittelwerte untereinander und mit den durch die CIRA89-Modellatmosphäre vorgegebenen Verläufen (vgl. Abb. 29). In El Arenosillo stehen 43, in Biscarosse 52 und in Andoya 58 Meßtage zur Verfügung. Die statistischen Fehler der Nachtmittelwerte betragen

- in El Arenosillo 0.5 bis 2 K,
- in Biscarosse 1 bis 2 K und
- in Andoya 0.5 bis 2 K.

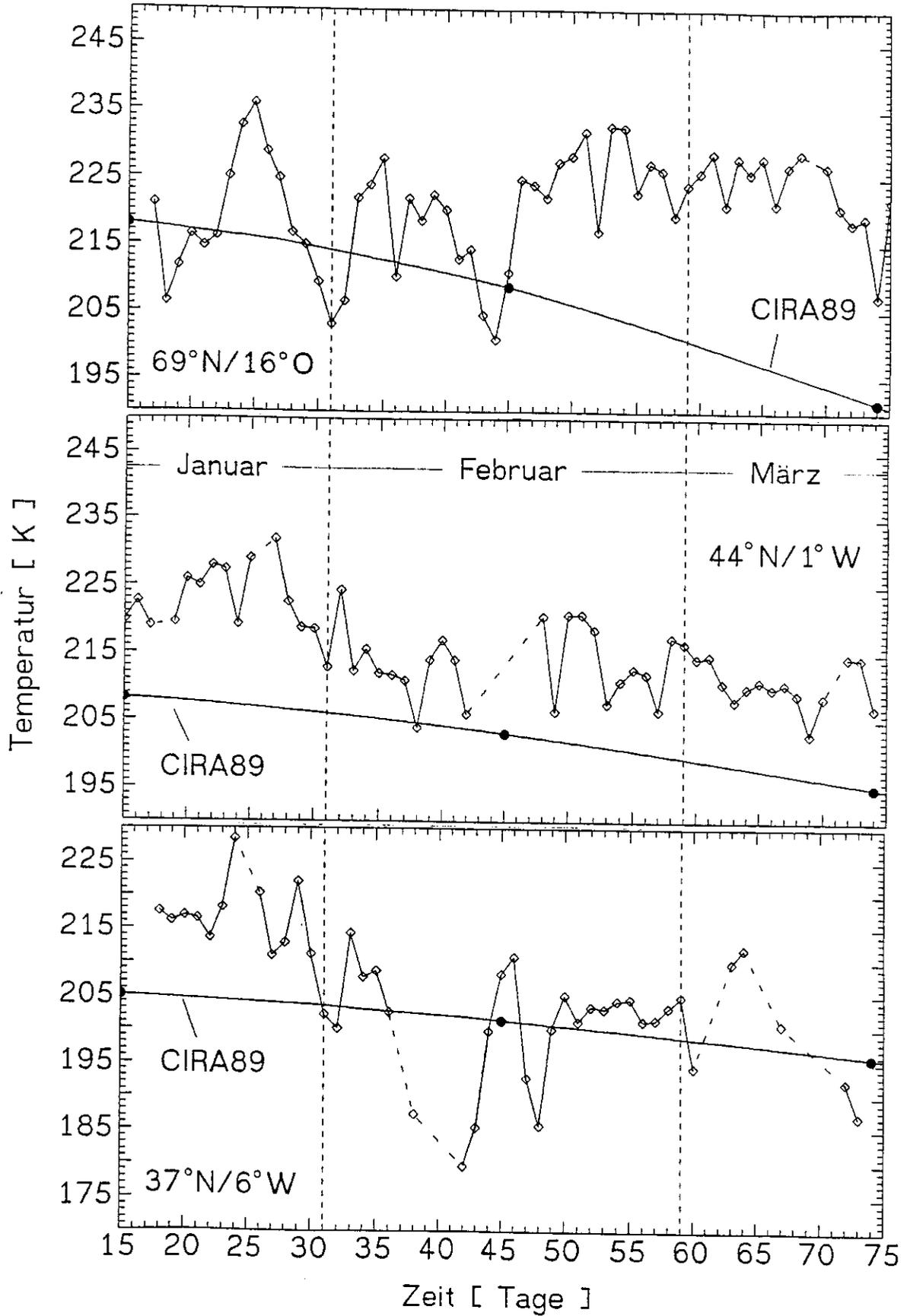


Abb. 29: Temperaturverläufe in Andoya, Biscarosse und El Arenosillo (Tag 1 \equiv 01.01.1990).

Man erkennt eine qualitative Übereinstimmung der gemessenen Temperaturverläufe in El Arenosillo und Biscarosse. An beiden Orten herrschen im Januar hohe Temperaturen vor, denen eine kurzperiodische Variation im Bereich von ca. 5 Tagen überlagert ist. Im Februar nehmen die Temperaturen ab. Im Unterschied hierzu kann in Andoya für den gesamten Zeitraum von Januar bis März eine nahezu konstante mittlere Temperatur festgestellt werden. Dieser konstanten mittleren Temperatur sind in der Zeit von Januar und Mitte Februar langperiodisch Temperaturvariationen mit Periodendauern um 5 und sehr viel ausgeprägter um 11 Tage überlagert.

Ab Mitte Februar ändert sich der Verlauf der Temperaturen. Die Temperaturschwankungen nehmen ab, die in Andoya bis dahin vorherrschende langperiodische Variation geht in kurzperiodische Schwankungen mit verringerter Amplitude über. In Biscarosse deutet sich eine Verschiebung der Temperaturvariation zu längeren Perioden mit ebenfalls verringerter Amplitude an. Die Datenlage läßt für El Arenosillo eine derartige Aussage nicht zu (lediglich 6 Temperaturwerte im März).

Der qualitative Temperaturverlauf stimmt in El Arenosillo und Biscarosse bis auf die zuvor beschriebenen Periodizitäten im gesamten Meßzeitraum gut mit dem CIRA89-Temperaturverlauf überein. In Andoya ist ab Mitte Februar eine ca. 20 K betragende mittlere Abweichung festzustellen.

Der Bruch in den Temperaturverläufen fällt mit der am 12.02.1990 beobachteten Stratosphärenenerwärmung (Naujokat et al., 1990) zusammen. Zur Untersuchung der in den Rohdaten angedeuteten Periodizitäten werden die Daten der bereits erwähnten FFT-Analyse unterworfen. Dabei werden die Analysefenster in Anlehnung an den Zeitpunkt der Stratosphärenenerwärmung gewählt.

In Abbildung 30 werden die Ergebnisse der FFT-Analyse graphisch dargestellt. Wie schon zuvor sind nur qualitative Aussagen über die Periodendauern möglich (vgl. Kap. 4.2).

In Andoya dominiert in der ersten Hälfte des Meßzeitraumes eindeutig die 10.7-Tage-Periode, welche in der zweiten Hälfte vollkommen verschwindet. In Biscarosse ergibt sich für diese Periode ein entgegengesetztes Verhalten. In der ersten Hälfte des Meßzeitraumes ist die 10.7-Tage-Periode nicht vorhanden. In der zweiten Hälfte deutet sich eine 10.7-Tage-Periode an. In El Arenosillo ist diese Periode im gesamten Meßzeitraum erkennbar. An allen Meßorten treten 4- bis 5-tägige Perioden auf, die in beiden Datenfenstern mit unterschiedlicher relativer spektraler Dichte erscheinen. Die geringfügig unterschiedlichen Perioden (4.5 / 5 Tage) an den jeweiligen Meßorten können durch zonale Winde erklärt werden (Gerndt, 1986).

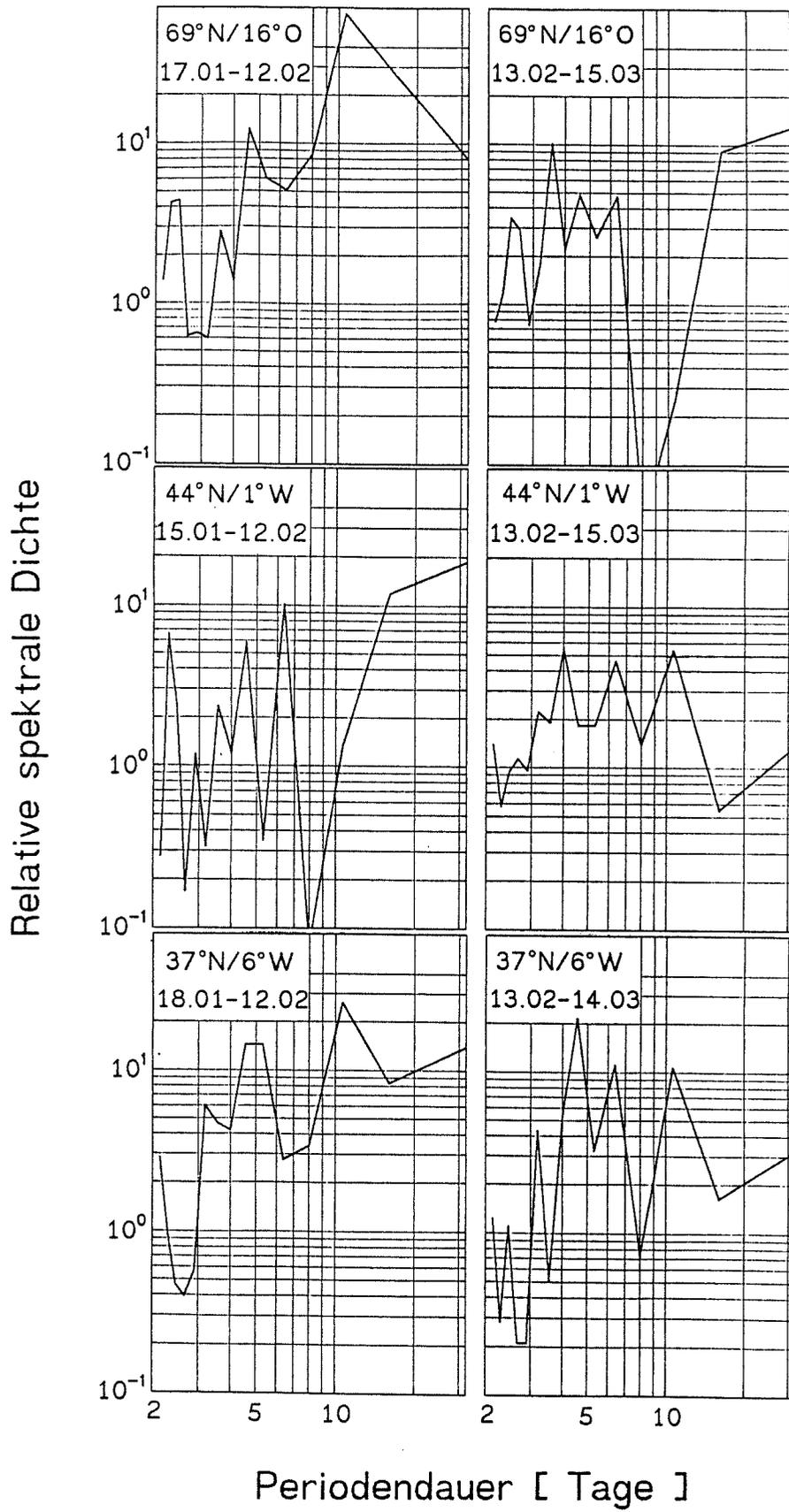


Abb. 30: Vergleich der FFT-Analysen für verschiedene Meßorte.

Die starke Präsenz der 10.7-Tage-Periode ist ein weiteres Indiz für die bereits in der klimatologischen Untersuchung festgestellten charakteristischen "Winterbedingungen".

Das zentrale Ergebnis der FFT-Analyse ist ein Hinweis auf die grundlegende Änderung des dynamischen Atmosphärensystems in zeitlicher Koinzidenz mit einer Stratosphärenenerwärmung.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Bestimmung der Atmosphären-temperatur in 86 km Höhe mittels Infrarot-Spektrometrie beschrieben. Der Aufbau der beiden verwendeten IR-Spektrometer sowie ihre Eichung sind Gegenstand der Betrachtung. Ein Eichstandard wird aufgestellt, der sich auf Emissionsspektren verschiedener Gasentladungslampen stützt.

Ein Verfahren zur Verringerung von Störeinflüssen wird entwickelt. Über 5 Monate hinweg werden die beiden Spektrometer in einer Interkalibrierungsmessung betrieben. Bei schlechtem Wetter (bewölkerter Himmel, Nebel usw.) tritt ein auf die unterschiedlichen Gesichtsfelder zurückzuführender systematischer Temperaturunterschied von 1.8 K auf. Durch Verwendung einer Untergrundkorrektur kann diese Temperaturverschiebung verringert werden.

Vergleiche mit verschiedenen anderen Temperaturmeßmethoden im Bereich der Mesosphäre ergeben keine systematischen Abweichungen zum Falling-Sphere-Meßsystem; zum LIDAR-System ergibt sich eine systematische Abweichung von 8 K.

Langzeituntersuchungen in Wuppertal weisen auf ein Ansteigen der OH*-Temperaturen um 8.5 K pro Dekade hin.

Die klimatologischen Untersuchungen von Wellenphänomenen deuten auf wiederkehrende Bedingungen im Winter und im Sommer hin. Diese zeichnen sich durch eine große Häufigkeit langperiodischer (Periode ≥ 8 Tage) im Winter und kurzperiodischer Wellen (Periode ≤ 6.4 Tage) im Sommer aus.

Vergleicht man die Temperaturverläufe in Biscarosse (44°N/1°W) und Wuppertal (51°N/7°O) im Jahr 1990, stellt man einen deutlichen Breitengang der OH*-Temperatur fest: Im Sommer liegen die Temperaturen in Biscarosse um bis zu 5 K höher, im Winter bis zu 9 K tiefer als in Wuppertal. Ein ähnlicher Breitengang wird auch von der CIRA89-Modellatmosphäre für die beiden Orte vorausgesagt.

Im Rahmen der DYANA-Kampagne wurden Daten unterschiedlicher Meßorte (El Arenosillo, Biscarosse, Andoya) auf horizontale Kohärenz periodischer Temperaturänderungen untersucht. Dabei wurden dominante Periodendauern von 10.7 sowie im Bereich von 5 Tagen festgestellt. Interessant ist hierbei ein Bruch in den Temperaturverläufen, der mit einer Stratosphärenenerwärmung in zeitlichem Zusammenhang steht. Dieser Bruch ist auch nach einer Fourier-Analyse der Meßwerte erkennbar.

Danksagung

Herrn Prof. D. Offermann danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung von Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

Herrn A. Hauchecorne und Herrn J. Scheer danke ich für die Möglichkeit, Daten Ihrer Meßsysteme im Vergleich zu OH⁺-Messungen im Rahmen dieser Arbeit benutzen zu können.

Für die erfolgreiche Zusammenarbeit während der DYANA-Kampagne und die Betreuung des Spektrometers I in der Zeit von April bis Dezember 1990 in Biscarosse danke ich Herrn A. Mourier.

6. Literatur

- Aikin, A.C., M.L. Chanin, J. Nash, D.J. Kending, Temperature trends in the lower mesosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 416, 1991.
- Baker, D.J., Studies of atmospheric emissions, AFGL-TR-78-0251, AFGL, Hanscom AFB, Ma 01731, 1978.
- Baker, D.J., A.T. Stair, Jr., Rocket measurements of the altitude distribution of the hydroxyl airglow, *Phys. Scri.*, 37, 611, 1988.
- Battner, E., J.J. Lopez-Moreno, Time and altitude variations of vibrationally excited states of atmospheric hydroxyl, *Planet. Space Sci.*, 27, 1421, 1979.
- Bloomfield, P., Fourier analysis of time series: An introduction, John Wiley & Sons, New York 1976.
- CIRA86, COSPAR International Reference Atmosphere, veröffentlicht in: Barnett, J.J., M. Corney, Middle atmosphere reference model derived from satellite data, *MAP Handbook*, 16, 47, 1985.
- CIRA89, COSPAR International Reference Atmosphere, veröffentlicht in: Chandra, S.C., E.L. Fleming, M.R. Schoeberl, J.J. Barnett, Monthly mean global climatology of temperature, wind, geopotential height and pressure for 0-120 km, *Adv. Space Res.*, 10, (6)3, 1990.
- Chanin, M.L., A. Hauchecorne, Lidar studies of temperature and density using Rayleigh scattering, *MAP Handbook*, 13, 87, 1984.
- DeMore, W.B., D.M. Golden, R.F. Hampson, C.J. Howard, M.J. Molina, Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling, NASA JPL Publication 90-1, S. 19, Pasadena, California, 1990.
- Geller, M.A., Middle atmosphere dynamics and composition, veröffentlicht in: Deehr, C.S., J.A. Holtet (eds.), *Exploration of the polar upper atmosphere*, S. 1-16, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1980.

- Gerndt, R., Messung der Mesopausentemperatur und ihrer Variationen mit einem Infrarot-Spektrometer, Diplomarbeit WU D 82-7, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 1982.
- Gerndt, R., Untersuchung der Temperaturvariation in der oberen Mesosphäre mit Infrarot-Spektrometern, Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation WU B-DI 86-2, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 1986.
- Harrison, A.W., D.J.W. Kendall, Airglow hydroxyl intensity measurements 0.6-2.3 μ , Planet. Space Sci., 21, 1731, 1973.
- Hauchecorne, A., M.L. Chanin, P. Keckut, Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33-87 km) as seen by Rayleigh Lidar over the South of France, J. Geophys. Res., im Druck.
- Homann, D., Ein Lock-In Verstärker für das CRISTA Infrarot-Spektrometer, Diplomarbeit WU D 87-4, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 1987.
- Kaye, J.A., On the possible role of the reaktion $O+HO_2 \rightarrow OH+O_2$ in the OH airglow, J. Geophys. Res., 93, 285, 1988.
- Krassovsky, V.I., N.N. Shefov, V.I. Yarin, Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 A, Planet. Space Sci., 9, 883, 1962.
- Labitzke, K., G. Brasseur, B. Naujokat, A. De Rudder, Long-term temperature trends in the stratosphere : possible influence of anthropogenic gases, Geophys. Res. Lett., 13, 52, 1986.
- Lange, G., Messung der Infrarotemissionen von OH^* und O_2 in der Mesosphäre, Dissertation WU B-DI 82-3, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 1982.
- Llewellyn, E.J., B.H. Long, B.H. Solheim, The quenching of OH in the atmosphere, Planet. Space Sci., 26, 525, 1978.
- Lopez-Moreno, J.J., R. Rodrigo, F. Moreno, M. Lopez-Puertas, A. Molina, Altitude distribution of vibrationally excited states of atmospheric hydroxyl at levels $\gamma = 2$ to $\gamma = 7$, Planet. Space Sci., 35, 1029, 1987.

- McDade, I.C., E.J. Llewellyn, Kinetic parameters related to sources and sinks of vibrationally excited OH in the nightglow, *J. Geophys. Res.*, 92, 7643, 1987.
- Meinel, A.B., OH emissions in the spectrum of the night sky I, *Astrophys. J.*, 111, 555, 1950.
- Meinel, A.B., OH emissions in the spectrum of the night sky II, *Astrophys. J.*, 112, 120, 1950.
- Mies, F.H., Calculated vibrational transition probabilities of OH($X^2 \Pi$), *J. Mol. Spec.*, 53, 150, 1974.
- Naujokat, B., K. Labitzke, R. Lenschow, K. Petzold, R.-C. Wohlfart, The stratospheric winter 1989/90: Very cold with a pronounced minor warming and a late final warming, *Beilage zur Berliner Wetterkarte, Amtsblatt des Instituts für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Berlin, 1990.*
- Neuber, R., P. von der Gathen, U. von Zahn, Altitude and temperature of the mesopause at 69°N latitude in winter, *J. Geophys. Res.*, 93, 11093, 1988.
- Neumann, A., QBO and solar activity effects on temperatures in the mesopause region, *J. Atm. Terr. Phys.*, 52, 163, 1990.
- Offermann, D., The DYANA campaign 1990, Proceedings of the ninth ESA/Pac-symposium on european rocket and balloon programmes and related research, Lahnstein 1989, ESA SP-291, S. 259-267, ESA, Noordwijk, Netherlands, 1988.
- Roble, R.G., R.E. Dickinson, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and themosphere ?, *Geophy. Res. Lett.*, 6, 1441, 1989.
- Rodrigo, R., J.J. Lopez-Moreno, M. Lopez-Puertas, F. Moreno, A. Molina, Neutral atmospheric composition between 60 and 220 km, *Planet. Space Sci.*, 34, 723, 1986.
- Scheer, J., E.R. Reisin, Rotational temperatures for OH and O₂ airglow bands measured simultaneously from El Leoncito (31°/48'S), *J. Atm. Terr. Phys.*, 54, 47, 1990.

- Schmidlin, F.J., H.S. Lee, W. Michel, Evidence for accurate temperatures from the inflatable falling sphere, Proceedings of the ninth ESA/Pac-symposium on european rocket and balloon programmes and related research, Lahnstein 1989, ESA SP-291, S. 55-58, ESA, Noordwijk, Netherlands, 1988.
- Sivjee, G.G., R.M. Hamwey, Temperature and chemistry of the polar mesopause OH, J. Geophys. Res., 92, 4663, 1987.
- Stewart, J.E., Infrared spectroscopy: Experimental methods and techniques, Marcel Dekker Inc., New York, 1970.
- Taubenheim, J., G. von Cossart, G. Entzian, Evidence of CO₂-induced progressive cooling of the middle atmosphere derived from radio-observations, Adv. Space Res., 10, 171, 1990.
- Texier, H. Le, S. Solomon, R.R. Garcia, Seasonal Variability of the OH Meinel Bands, Planet. Space Sci., 35, 977, 1987.
- U.S. Standard Atmosphere, US Government Printing Office, Washington D.C., 1976.
- Wyatt, C.L., Radiometric calibration: Theory and methods, Kap. 4, S. 29-33, Academic Press, London 1978.
- Zahn, U. v., K.H. Fricke, R. Gerndt, T. Blix, Mesospheric temperatures and the OH layer height as derived from ground-based lidar and OH* spectrometry, J. Atm. Terr. Phys., 49, 863, 1987.
- Zaidel', A.N., V.K. Prokof'ev, S.M. Raiskii, V.A. Slavnyi, E.Ya. Shreider, Tables of spectral lines, Kap. 2, S. 392, 506, Plenum Press, London 1970.

7. Anhang

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Seite

Abbildungen

Abb. A1: Spektrometer I: Airglow-Spektrum im Bereich von 1.1 bis 1.7 μm	A1
Abb. A2: Spike-Filter Schaltung	A2
Abb. A3: Gesichtsfeld der OH [*] -Spektrometer (0°-Zenitwinkel)	A3
Abb. A4: Gesichtsfeld der OH [*] -Spektrometer (45°-Zenitwinkel)	A3
Abb. A5: Temperaturverlauf während der Interkalibrierung	A8

Tabellen

Tab. A1: Spektrale Position der Linienemission der Eichlichtquellen	A4
Tab. A2: Interkalibrierung der Spektrometer I und II	A5
Tab. A3: Vergleich der aus Intensitätsmessungen abgeleiteten OH [*] -Temperaturen mit OH [*] -äquivalenten Temperaturen anderer Meßsysteme	A9
Tab. A4: OH [*] -Temperaturmittelwerte	A11
Spektrometer I (Wuppertal, 1989)	A11
Spektrometer I (Biscarosse, 1989)	A13
Spektrometer II (Wuppertal, 1987-1991)	A16
Spektrometer II (Andoya, 1990)	A31
Spektrometer II Untergrundkorrigierte Temperaturen (Wuppertal, 1987-1991)	A32

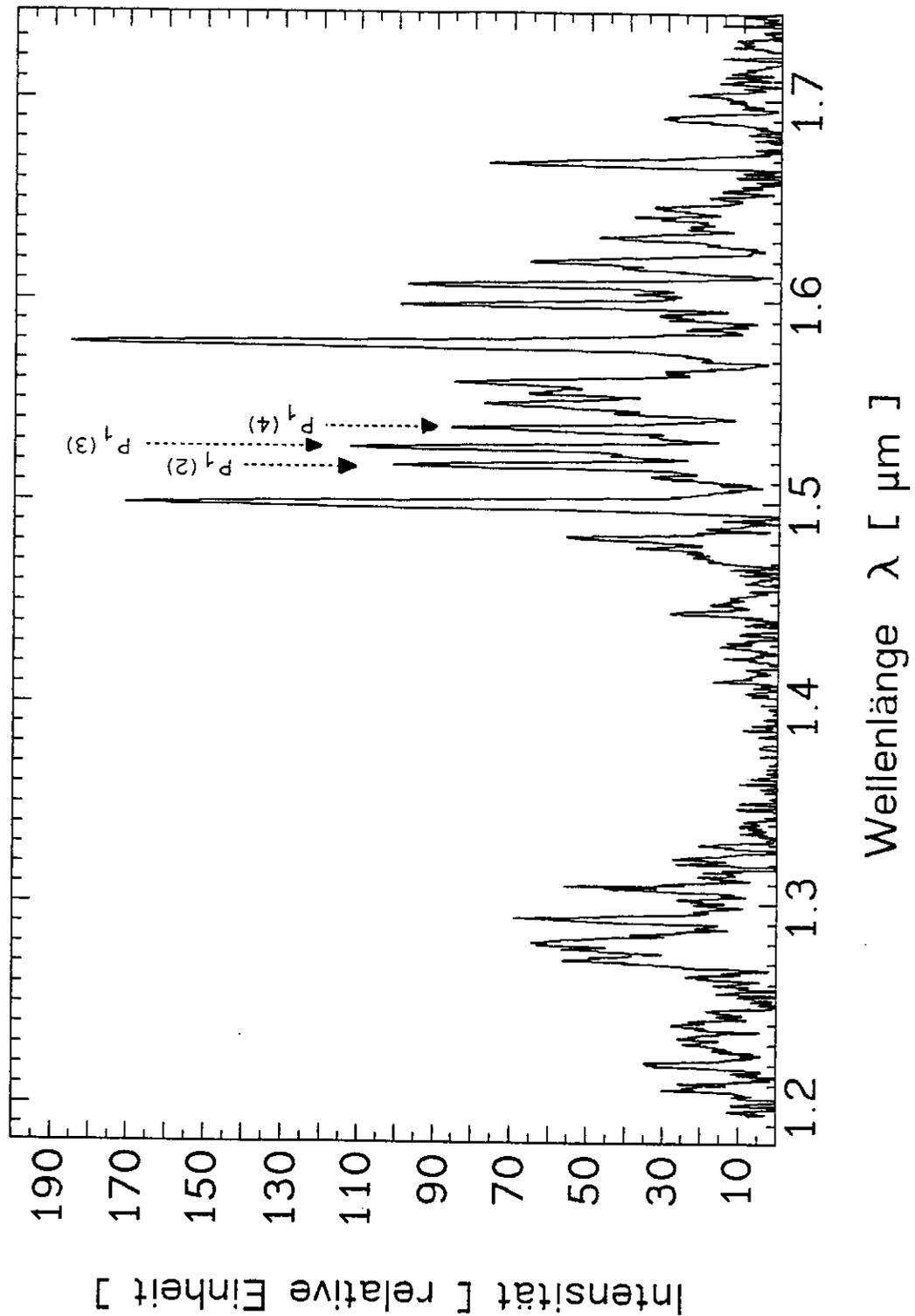
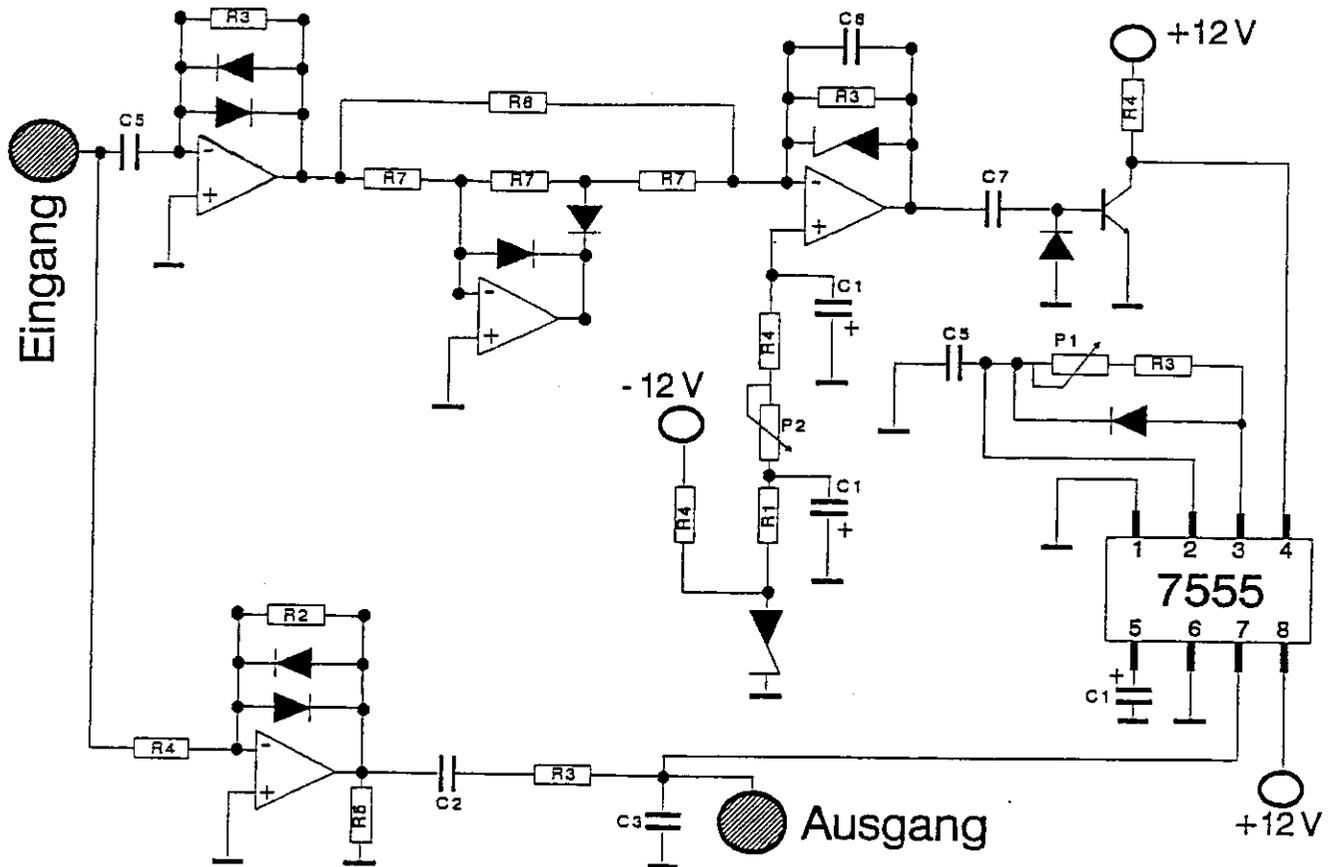


Abb. A1: Spektrometer I: Airglow-Spektrum im Bereich von 1.1 bis 1.7 μm (aufgezeichnet in Wuppertal am 24.02.1991). Die drei zur Temperaturbestimmung benutzten OH^* -Emissionen sind durch Pfeile gekennzeichnet.



R 1 : 220 k Ω	R 2 : 150 k Ω	R 3 : 100 k Ω
R 4 : 10 k Ω	R 5 : 6.2 k Ω	R 6 : 2.0 k Ω
R 7 : 1.0 k Ω	P 1 : 0-500 k Ω	P 2 : 0-50 k Ω
C 1 : 6.8 μ F	C 2 : 0.33 μ F	C 3 : 22 nF
C 4 : 15 nF	C 5 : 2.7 nF	C 6 : 82 pF
C 7 : 6.8 nF		

Abb. A2: Spike-Filter Schaltung

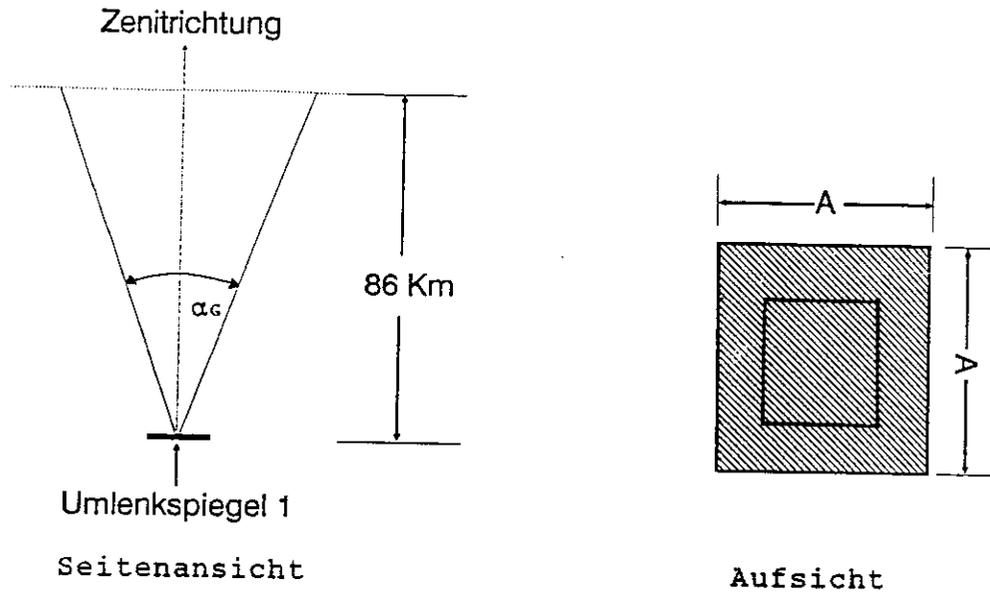


Abb. A3: Gesichtsfeld der OH*-Spektrometer (0°-Zenitwinkel)

A : Spektrometer I : 11 km
 Spektrometer II : 20 km

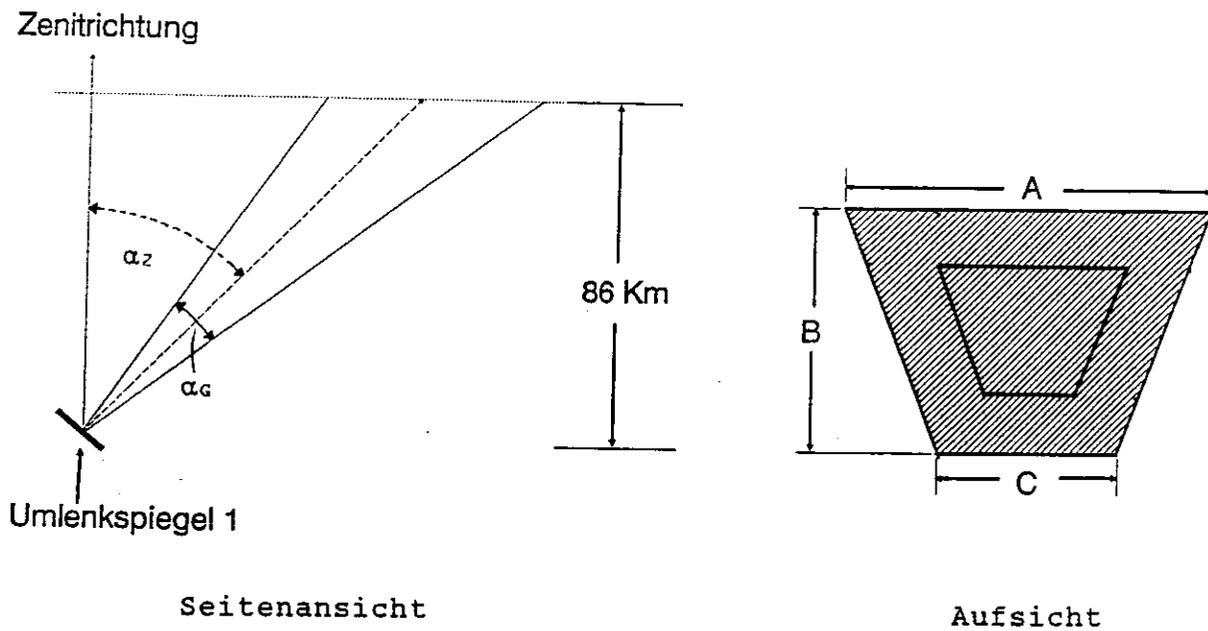


Abb. A4: Gesichtsfeld der OH*-Spektrometer (45°-Zenitwinkel)

	Spektrometer I	Spektrometer II
α_Z	45°	45°
α_G	7.3°	13.5°
A	17 km	33 km
B	22 km	41 km
C	15 km	26 km

Tab. A1: Spektrale Position der Linienemissionen der Eichlichtquellen

Die zur Identifizierung der Linienemissionen benutzte Numerierung stimmt mit den in Abb. 10 und 11 verwendeten Kennzeichnungen der Linien überein.

Eichlichtquelle	Ident.-Nr.	λ [μm]
Osram Cd/10-Spektrallampe	1	1.3979
	2	1.4330
	3	1.4475
	4	1.4853
	5	1.5155
	6	1.5714
	7	1.6434
	8	1.6482
Osram Hg/10-Spektrallampe	1	1.3210
	2	1.3427
	3	1.3570
	4	1.3674
	5	1.3951
	6	1.5296
	7	1.6942
	8	1.7110

Tab. A2: Interkalibrierung der Spektrometer I und II
(Temperaturdaten)

T_{s1} : Temperaturmittelwert für Spektrometer I
 T_{s2} : " " " II
 ΔT_{s1} : Schwankung des Temperaturmittelwertes (Spektrometer I)
 ΔT_{s2} : " " " (Spektrometer II)
 T_R : Temperaturresiduum ($T_R = T_{s1} - T_{s2}$)

Meßtage mit geringer Bewölkung werden mit g, solche ohne Bewölkung mit k gekennzeichnet.

Datum	T_{s1} (K)	ΔT_{s1} (K)	T_{s2} (K)	ΔT_{s2} (K)	T_R (K)
6 7 89	181.85	4.8	175.70	0.9	6.15
11 7 89	178.25	3.4	182.60	0.8	-4.35
18 7 89	187.80	8.7	188.10	1.6	-0.30
19 7 89	178.10	1.5	179.20	0.8	-1.10
22 7 89	168.40	1.3	171.60	0.5	-3.20
23 7 89	181.30	2.7	186.30	0.9	-5.00
24 7 89	185.70	1.4	189.70	0.8	-4.00
25 7 89	182.90	1.7	187.40	0.8	-4.50
27 7 89	188.80	4.4	195.70	1.9	-6.90
28 7 89 g	182.90	1.4	182.60	0.5	0.30
29 7 89	183.40	1.5	188.70	0.8	-5.30
2 8 89	183.00	2.4	192.30	1.7	-9.30
3 8 89	177.50	1.8	178.50	1.0	-1.00
5 8 89 g	180.30	1.3	182.40	0.7	-2.10
6 8 89 g	180.20	1.4	180.20	0.6	0.00
7 8 89	187.90	1.4	189.30	0.7	-1.40
10 8 89	185.70	1.8	188.70	0.9	-3.00
11 8 89 g	188.40	3.0	193.30	1.2	-4.90
14 8 89	191.60	3.0	191.80	2.6	-0.20
15 8 89	185.50	2.5	188.00	1.2	-2.50
18 8 89	186.40	2.1	190.90	1.0	-4.50
19 8 89 g	192.20	1.6	195.70	0.9	-3.50
20 8 89	195.30	2.0	199.50	0.8	-4.20
21 8 89	186.40	1.5	194.90	0.8	-8.50
22 8 89	196.80	1.9	200.10	0.9	-3.30
24 8 89 g	203.10	1.3	204.40	0.6	-1.30

Datum		Ts 1 (K)	$\Delta T_{s 1}$ (K)	Ts 2 (K)	$\Delta T_{s 2}$ (K)	T _R (K)
31	8 89	207.30	2.1	210.00	1.0	-2.70
2	9 89 g	208.10	1.4	207.80	0.8	0.30
5	9 89 g	207.90	1.1	212.40	0.6	-4.50
6	9 89 g	211.30	1.1	208.40	0.5	2.90
8	9 89 g	204.50	1.3	204.10	0.7	0.40
9	9 89 g	206.40	1.2	207.60	0.7	-1.20
10	9 89	209.00	1.7	213.40	1.0	-4.40
11	9 89	217.50	1.9	219.30	1.0	-1.80
12	9 89	213.30	0.9	215.00	0.6	-1.70
13	9 89	210.60	2.4	218.60	1.0	-8.00
20	9 89 g	214.10	1.6	210.00	0.8	4.10
21	9 89 g	209.90	1.2	209.30	0.7	0.60
22	9 89 g	211.30	1.1	210.60	0.6	0.70
23	9 89	206.80	1.8	212.40	1.0	-5.60
26	9 89 g	207.40	1.3	210.40	0.8	-3.00
27	9 89 g	210.20	1.6	208.20	1.1	2.00
29	9 89 g	222.80	5.0	220.20	1.3	2.60
30	9 89	200.90	2.4	204.60	1.5	-3.70
4	10 89 g	205.50	1.3	207.20	0.7	-1.70
5	10 89 g	209.40	1.6	209.10	0.7	0.30
6	10 89 g	212.50	1.1	212.90	0.6	-0.40
10	10 89	221.80	3.0	220.80	1.6	1.00
12	10 89	218.90	2.0	220.20	1.0	-1.30
16	10 89	214.20	1.1	217.60	0.5	-3.40
17	10 89 g	210.60	1.2	215.90	0.5	-5.30
19	10 89	214.90	1.3	218.40	0.6	-3.50
20	10 89	216.70	1.2	219.70	0.6	-3.00
22	10 89 g	217.60	1.1	218.20	0.6	-0.60
23	10 89	217.30	1.1	224.20	0.6	-6.90
25	10 89 g	216.70	1.9	219.00	0.7	-2.30
27	10 89	217.90	1.9	227.30	0.8	-9.40
28	10 89 g	218.10	1.4	217.20	0.8	0.90
29	10 89	217.70	2.0	217.30	0.9	0.40
31	10 89	222.30	2.6	221.90	1.3	0.40
1	11 89	225.60	3.8	224.00	2.3	1.60
3	11 89	224.30	3.8	226.50	1.4	-2.20
4	11 89 g	225.00	2.0	224.30	0.6	0.70
10	11 89 k	220.90	1.3	222.10	0.6	-1.20
12	11 89 k	235.00	1.5	233.70	0.5	1.30
13	11 89 k	232.80	1.0	235.60	0.5	-2.80

Datum		Ts 1 (K)	ΔTs 1 (K)	Ts 2 (K)	ΔTs 2 (K)	TR (K)
14 11 89	k	230.60	1.0	231.40	0.4	-0.80
17 11 89	k	221.30	1.3	221.80	0.5	-0.50
18 11 89	k	214.90	1.3	215.50	0.6	-0.60
19 11 89	k	219.50	1.6	220.60	0.5	-1.10
20 11 89	k	218.30	1.6	219.40	0.6	-1.10
21 11 89	k	221.60	1.0	220.00	0.6	1.60
23 11 89	k	218.10	2.8	216.20	0.8	1.90
25 11 89	k	224.10	1.5	222.90	0.7	1.20
26 11 89		228.00	1.4	225.50	0.8	2.50
29 11 89	k	213.00	1.6	215.60	0.5	-2.60
30 11 89	k	221.10	1.2	220.10	0.5	1.00
1 12 89	k	227.30	1.0	225.70	0.4	1.60
2 12 89	k	231.20	1.0	232.60	0.4	-1.40
3 12 89	k	226.90	0.8	229.70	0.4	-2.80

Mittleres Temperaturresiduum TR m :

alle Daten :

$$T_{Rm} = - 1.8 \pm 0.3 \text{ K}$$

gute und sehr gute Meßbedingungen :

$$T_{Rm} = - 0.5 \pm 0.3 \text{ K}$$

sehr gute Meßbedingungen :

$$T_{Rm} = - 0.2 \pm 0.4 \text{ K}$$

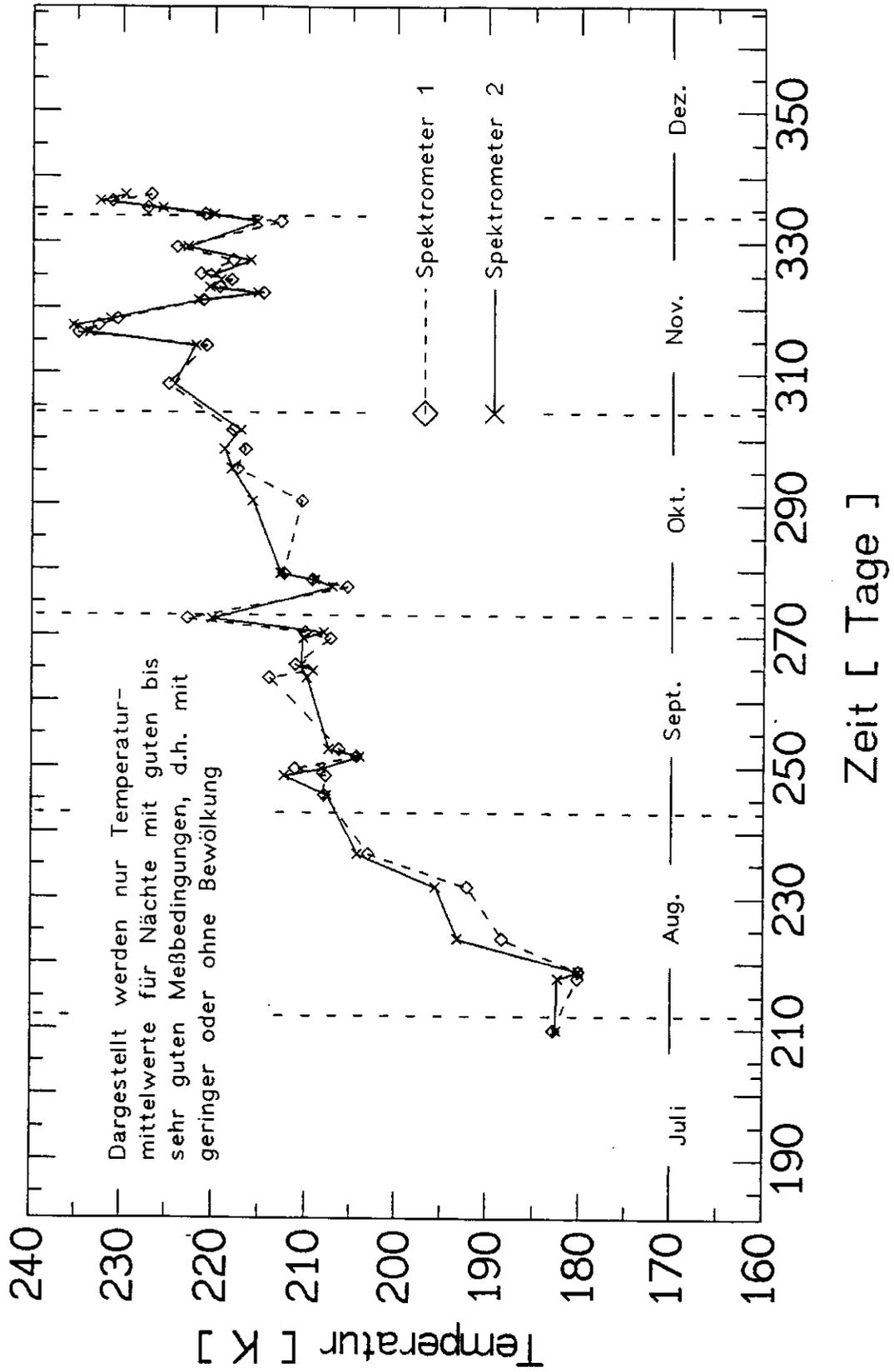


Abb. A5: Temperaturverlauf während der Interkalibrierung

Tab. A3: Vergleich der aus Intensitätsmessungen abgeleiteten OH*-Temperaturen mit OH*-äquivalenten Temperaturen anderer Meßsysteme.

mit: $T_{E\varnothing}$ \equiv OH*-äquivalente Temperatur
 $T_{s1,2}$ \equiv aus OH*-Messung abgeleitete Temperatur
 T_R \equiv Temperaturresiduum zwischen OH* und OH*-
 äquivalenter Temperatur
 Datum \equiv Angabe des Datums bezieht sich immer auf
 das Datum des auf den Beginn der Messung
 folgenden Tages.

Alle Vergleichsmessungen wurden 1990 in Biscarosse (44°N/1°W) durchgeführt.

LIDAR-Messungen :

Datum	Zeitintervall [UT]	$T_{E\varnothing}$ [K]	T_{s1} [K]	T_R [K]
19.01.	19:45 - 06:30	209.0 \pm 5	218.6 \pm 1	9.6
22.01.	20:40 - 06:45	230.3 \pm 5	226.5 \pm 1	-3.8
23.01.	20:20 - 05:20	220.8 \pm 7	224.7 \pm 1	3.9
05.02.	18:50 - 06:15	202.4 \pm 4	210.6 \pm 1	8.2
06.02.	18:25 - 21:40	207.9 \pm 12	209.9 \pm 3	1.9
07.02.	20:10 - 23:30	195.8 \pm 12	204.8 \pm 3	9.0
08.02.	21:15 - 22:00	209.1 \pm 18	214.5 \pm 5	5.4
18.02.	20:45 - 06:15	198.7 \pm 10	206.1 \pm 1	7.4
20.02.	19:00 - 06:05	213.9 \pm 5	218.2 \pm 1	4.3
22.02.	19:10 - 04:00	190.1 \pm 7	203.4 \pm 1	13.3
23.02.	19:00 - 06:00	197.7 \pm 5	209.8 \pm 1	12.1
03.03.	21:20 - 05:40	201.3 \pm 4	206.1 \pm 1	4.8
04.03.	20:50 - 05:50	189.6 \pm 6	206.0 \pm 1	16.4
06.03.	18:50 - 05:45	199.0 \pm 4	208.9 \pm 1	9.9
07.03.	23:10 - 05:40	186.5 \pm 6	205.1 \pm 1	18.6
08.03.	22:10 - 01:55	196.4 \pm 11	202.4 \pm 1	6.0
10.03.	19:55 - 05:40	193.4 \pm 4	202.0 \pm 1	8.6
11.03.	19:41 - 03:35	196.1 \pm 5	204.8 \pm 1	8.7
13.03.	22:20 - 03:40	199.9 \pm 11	218.6 \pm 2	18.7
15.03.	19:45 - 05:30	197.6 \pm 4	204.1 \pm 1	6.5
16.03.	19:15 - 05:25	196.9 \pm 4	208.4 \pm 1	11.5
17.03.	20:40 - 05:25	205.2 \pm 5	206.3 \pm 1	1.1

Falling-Sphere :

Datum	Zeitintervall [UT]		T_{E0}	T_{S1}	T_R
	Falling-Sphere	OH*	[K]	[K]	[K]
15.01.	19:18:23 19:19:00	19:14 19:19	207.1 ± 2.3	203.9 ± 10	-3.2
18.01.	20:10:32 20:11:08	20:05 20:14	204.3 ± 1.9	210.7 ± 6.5	6.4
22.01	19:18:23 19:19:00	19:15 19:24	223.1 ± 2.0	209.1 ± 4.8	-14
05.02.	19:48:39 19:49:14	19:46 19:50	205.1 ± 1.5	217.3 ± 3.8	12.2
20.02.	03:28:31 03:29:08	03:24 03:33	217.3 ± 1.9	226.8 ± 2.3	9.5
20.02.	05:17:31 05:18:08	05:15 05:24	231.4 ± 1.8	231.3 ± 4.8	-0.1
20.02.	06:32:34 06:33:10	06:19 06:24	228.5 ± 1.8	226.8 ± 4.6	-1.7
22.02.	19:33:34 19:34:11	19:25 19:37	195.7 ± 1.5	204.9 ± 2.3	9.2
06.03.	05:07:27 05:08:05	05:04 05:12	219.3 ± 1.9	218.4 ± 6.2	-0.9
13.03.	02:48:12 02:48:51	02:41 02:50	207.7 ± 2.3	208.0 ± 6.5	0.3
13.03.	03:43:29 03:44:06	03:15 03:24	204.6 ± 1.9	208.7 ± 3.3	4.1
15.03.	19:24:19 19:24:57	19:22 19:26	213.1 ± 2.0	202.8 ± 0.7	-10.3

Tab. A4: OH^{*}-Temperaturmittelwerte

Im folgenden sind die Nachtmittelwerte wiedergegeben, die ab Mai 1987 mit den beiden Spektrometern gemessen wurden.

Das Datum einer Messung wird wie folgt angegeben: Der jeweiligen Meßnacht wird das Datum des folgenden Tages zugeordnet. Dies bedeutet, daß z.B. für die Nacht vom 18. auf den 19. eines Monats der 19. als Datum der Messung gilt.

Spektrometer I:

(Wuppertal, 51°N/7°O)

Datum	Ts ₁ [K]	Datum	Ts ₁ [K]
6 7 89	181.9	11 7 89	178.3
18 7 89	187.8	19 7 89	178.1
22 7 89	168.4	23 7 89	181.3
24 7 89	185.7	25 7 89	182.9
27 7 89	188.8	28 7 89	182.9
29 7 89	183.4		
2 8 89	183.0	3 8 89	177.5
5 8 89	180.3	6 8 89	180.2
7 8 89	187.9	10 8 89	185.7
11 8 89	188.4	14 8 89	191.6
15 8 89	185.5	18 8 89	186.4
19 8 89	192.2	20 8 89	195.3
21 8 89	186.4	22 8 89	196.8
24 8 89	203.1	31 8 89	207.3
2 9 89	208.1	5 9 89	207.9
6 9 89	211.3	8 9 89	204.5
9 9 89	206.4	10 9 89	209.0
11 9 89	217.5	12 9 89	213.3
13 9 89	210.6	14 9 89	213.6

Datum	Ts ₁ [K]	Datum	Ts ₁ [K]
20 9 89	214.1	21 9 89	209.9
22 9 89	211.3	23 9 89	206.8
26 9 89	207.4	27 9 89	210.2
29 9 89	222.8	30 9 89	200.9
4 10 89	205.5	5 10 89	209.4
6 10 89	212.5	10 10 89	221.8
12 10 89	218.9	16 10 89	214.2
17 10 89	210.6	19 10 89	214.9
20 10 89	216.7	22 10 89	217.6
23 10 89	217.3	25 10 89	216.7
27 10 89	217.9	28 10 89	218.1
29 10 89	217.7	31 10 89	222.3
1 11 89	225.6	2 11 89	219.7
3 11 89	224.3	4 11 89	225.0
10 11 89	220.9	12 11 89	235.0
13 11 89	232.8	14 11 89	230.6
15 11 89	227.3	17 11 89	221.3
18 11 89	214.9	19 11 89	219.5
20 11 89	218.3	21 11 89	221.6
23 11 89	218.1	25 11 89	224.1
26 11 89	228.0	29 11 89	213.0
30 11 89	221.1		
1 12 89	227.3	2 12 89	231.2
3 12 89	226.9		

Biscarosse, 44°N/1°W

Die Messungen vom 15.01.1990 bis zum 15.03.1990 wurden im Rahmen der DYANA-Kampagne durchgeführt.

Datum	Ts ₁ [K]	Datum	Ts ₁ [K]
15 1 90	219.8	16 1 90	222.7
17 1 90	219.0	19 1 90	219.5
20 1 90	226.0	21 1 90	225.0
22 1 90	228.0	23 1 90	227.4
24 1 90	219.3	25 1 90	229.0
27 1 90	231.9	28 1 90	222.6
29 1 90	218.7	30 1 90	218.6
31 1 90	212.9		
1 2 90	224.3	2 2 90	212.4
3 2 90	215.6	4 2 90	212.0
5 2 90	211.8	6 2 90	211.0
7 2 90	204.0	8 2 90	214.0
9 2 90	217.0	10 2 90	214.0
11 2 90	206.0	17 2 90	220.6
18 2 90	206.4	19 2 90	220.8
20 2 90	220.8	21 2 90	218.6
22 2 90	207.6	23 2 90	210.9
24 2 90	212.7	25 2 90	211.9
26 2 90	206.5	27 2 90	217.3
28 2 90	216.5		
1 3 90	214.3	2 3 90	214.6
3 3 90	210.6	4 3 90	208.0
5 3 90	209.9	6 3 90	210.9
7 3 90	209.8	8 3 90	210.5
9 3 90	209.0	10 3 90	203.0
11 3 90	208.5	13 3 90	214.5
14 3 90	214.3	15 3 90	206.9
16 3 90	210.2	17 3 90	209.0
18 3 90	214.4	19 3 90	205.5
20 3 90	205.7	21 3 90	203.9
22 3 90	209.3	23 3 90	213.8
27 3 90	203.2	28 3 90	211.0
29 3 90	209.8	30 3 90	206.1

Datum	Ts ₁ [K]	Datum	Ts ₁ [K]
4 4 90	202.1	5 4 90	198.7
10 4 90	197.0	25 4 90	200.7
26 4 90	199.0		
3 5 90	195.4	4 5 90	192.4
16 5 90	187.9	17 5 90	194.2
18 5 90	188.2	22 5 90	194.1
29 5 90	187.2	30 5 90	193.6
31 5 90	184.1		
1 6 90	183.5	6 6 90	188.5
7 6 90	186.4	13 6 90	189.6
14 6 90	183.4	15 6 90	189.1
21 6 90	193.7	26 6 90	187.7
27 6 90	175.5	28 6 90	175.8
4 7 90	188.8	5 7 90	188.8
6 7 90	196.8	11 7 90	177.9
17 7 90	173.3	18 7 90	186.2
19 7 90	188.6	26 7 90	189.1
31 7 90	185.9		
1 8 90	190.1	2 8 90	190.5
3 8 90	190.8	7 8 90	196.3
8 8 90	202.6	9 8 90	188.6
10 8 90	195.2	17 8 90	201.6
21 8 90	196.1	22 8 90	188.8
23 8 90	188.9	28 8 90	196.8
29 8 90	197.2	30 8 90	212.1
31 8 90	202.7		
1 9 90	205.7	2 9 90	197.4
3 9 90	198.5	4 9 90	199.6
5 9 90	216.1	6 9 90	210.2
7 9 90	205.8	13 9 90	210.2
18 9 90	205.4	19 9 90	205.0
20 9 90	208.2	21 9 90	202.3
26 9 90	213.4	27 9 90	211.5
28 9 90	211.2		

Datum	T _{s1} [K]	Datum	T _{s1} [K]
2 10 90	214.1	16 10 90	211.2
17 10 90	208.9	18 10 90	208.0
19 10 90	213.8	23 10 90	216.1
25 10 90	220.8	26 10 90	222.3
6 11 90	211.5	7 11 90	203.6
8 11 90	214.5	9 11 90	212.5
14 11 90	224.0	15 11 90	221.4
22 11 90	212.9	23 11 90	219.5
28 11 90	217.6	30 11 90	216.7
4 12 90	215.6	6 12 90	212.8

Spektrometer II:

(Wuppertal, 51°N/7°O)

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
9 5 87	184.7	10 5 87	188.2
11 5 87	185.9	12 5 87	184.8
13 5 87	183.6	14 5 87	191.2
15 5 87	190.5	16 5 87	189.9
17 5 87	189.2	18 5 87	190.1
19 5 87	189.0	20 5 87	189.7
21 5 87	188.2	22 5 87	186.8
23 5 87	185.3	24 5 87	183.8
25 5 87	184.0	26 5 87	192.7
27 5 87	180.6	28 5 87	189.6
29 5 87	187.3	30 5 87	185.0
31 5 87	188.8		
1 6 87	188.0	2 6 87	186.1
3 6 87	183.6	4 6 87	181.0
5 6 87	180.6	6 6 87	176.3
7 6 87	182.5	8 6 87	181.9
9 6 87	181.2	10 6 87	180.6
11 6 87	179.9	12 6 87	179.3
13 6 87	178.7	14 6 87	178.0
15 6 87	177.4	16 6 87	176.7
17 6 87	176.1	18 6 87	175.5
19 6 87	174.8	20 6 87	174.2
21 6 87	173.5	22 6 87	172.9
23 6 87	172.3	24 6 87	171.6
25 6 87	171.0	26 6 87	170.3
27 6 87	169.7	28 6 87	169.0
29 6 87	168.4	30 6 87	174.4

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 7 87	182.8	2 7 87	174.9
3 7 87	179.0	4 7 87	179.3
5 7 87	174.4	6 7 87	175.4
7 7 87	181.0	8 7 87	186.2
9 7 87	180.2	10 7 87	175.0
11 7 87	178.0	12 7 87	177.5
13 7 87	176.9	14 7 87	174.8
15 7 87	180.2	16 7 87	177.8
17 7 87	182.9	18 7 87	181.8
19 7 87	180.7	20 7 87	181.1
21 7 87	186.9	22 7 87	176.1
23 7 87	187.6	24 7 87	185.5
25 7 87	183.4	26 7 87	181.3
27 7 87	181.8	28 7 87	183.2
29 7 87	184.5	30 7 87	183.7
31 7 87	187.2		
1 8 87	186.4	2 8 87	185.6
3 8 87	184.8	4 8 87	180.7
5 8 87	187.4	6 8 87	188.6
7 8 87	192.2	8 8 87	185.9
9 8 87	187.4	10 8 87	188.8
11 8 87	190.3	12 8 87	191.7
13 8 87	193.2	14 8 87	191.5
15 8 87	192.4	16 8 87	193.3
17 8 87	193.0	18 8 87	194.5
19 8 87	188.1	20 8 87	197.2
21 8 87	199.4	22 8 87	200.0
23 8 87	200.5	24 8 87	200.9
25 8 87	201.4	26 8 87	201.9
27 8 87	202.4	28 8 87	202.8
29 8 87	203.3	30 8 87	203.8
31 8 87	204.2		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 9 87	204.7	2 9 87	203.3
3 9 87	206.5	4 9 87	207.4
5 9 87	204.9	6 9 87	202.4
7 9 87	199.8	8 9 87	197.3
9 9 87	206.4	10 9 87	213.4
11 9 87	215.0	12 9 87	210.5
13 9 87	206.3	14 9 87	207.7
15 9 87	212.4	16 9 87	213.5
17 9 87	214.5	18 9 87	216.6
19 9 87	213.1	20 9 87	223.2
21 9 87	220.8	22 9 87	223.3
23 9 87	221.8	24 9 87	220.2
25 9 87	218.5	26 9 87	216.4
27 9 87	215.0	28 9 87	215.3
29 9 87	215.1	30 9 87	215.9
1 10 87	217.2	2 10 87	211.0
3 10 87	216.4	4 10 87	221.8
5 10 87	225.1	6 10 87	219.5
7 10 87	220.5	8 10 87	221.4
9 10 87	222.4	10 10 87	223.3
11 10 87	224.3	12 10 87	220.0
13 10 87	220.4	14 10 87	219.9
15 10 87	220.6	16 10 87	221.3
17 10 87	222.0	18 10 87	221.4
19 10 87	223.3	20 10 87	222.5
21 10 87	223.0	22 10 87	227.3
23 10 87	226.1	24 10 87	225.2
25 10 87	224.2	26 10 87	218.9
27 10 87	216.9	28 10 87	220.0
29 10 87	221.2	30 10 87	222.4
31 10 87	221.5		
1 11 87	227.1	2 11 87	221.9
3 11 87	216.6	4 11 87	219.8
5 11 87	219.0	6 11 87	212.3
7 11 87	217.4	8 11 87	222.4
9 11 87	232.8	10 11 87	230.8
11 11 87	228.7	12 11 87	226.7
13 11 87	224.6	14 11 87	222.6
15 11 87	218.7	16 11 87	218.4

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
17 11 87	218.1	18 11 87	220.8
19 11 87	222.9	20 11 87	225.0
21 11 87	223.8	22 11 87	221.1
23 11 87	218.5	24 11 87	215.8
25 11 87	224.1	26 11 87	224.5
27 11 87	224.8	28 11 87	225.1
29 11 87	225.5	30 11 87	225.8
1 12 87	232.4	2 12 87	226.7
3 12 87	221.1	4 12 87	215.4
5 12 87	208.9	6 12 87	216.1
7 12 87	215.8	8 12 87	215.5
9 12 87	214.4	10 12 87	211.3
11 12 87	213.0	12 12 87	214.7
13 12 87	216.4	14 12 87	217.8
15 12 87	224.3	16 12 87	230.8
17 12 87	213.5	18 12 87	215.8
19 12 87	218.0	20 12 87	220.2
21 12 87	222.4	22 12 87	224.7
23 12 87	226.9	24 12 87	232.7
25 12 87	233.4	26 12 87	234.2
27 12 87	234.9	28 12 87	234.6
29 12 87	236.5	30 12 87	228.7
1 1 88	233.1	2 1 88	233.5
3 1 88	233.9	4 1 88	234.3
5 1 88	234.8	6 1 88	235.2
7 1 88	235.6	8 1 88	236.0
9 1 88	236.4	10 1 88	225.0
11 1 88	212.6	12 1 88	214.0
13 1 88	223.1	14 1 88	220.0
15 1 88	227.4	16 1 88	233.5
17 1 88	239.6	18 1 88	227.4
19 1 88	227.4	20 1 88	229.9
21 1 88	224.9	22 1 88	226.1
23 1 88	222.5	24 1 88	218.8
25 1 88	215.2	26 1 88	225.9
27 1 88	224.8	28 1 88	223.7
29 1 88	229.2	30 1 88	221.5
31 1 88	225.5		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 2 88	229.5	2 2 88	223.4
3 2 88	225.4	4 2 88	227.3
5 2 88	228.2	6 2 88	234.9
7 2 88	227.4	8 2 88	225.0
9 2 88	222.3	10 2 88	225.0
11 2 88	215.8	12 2 88	226.1
13 2 88	224.9	14 2 88	228.6
15 2 88	226.3	16 2 88	230.5
17 2 88	231.0	18 2 88	234.9
19 2 88	238.7	20 2 88	228.4
21 2 88	212.1	22 2 88	212.0
23 2 88	212.0	24 2 88	211.9
25 2 88	211.8	26 2 88	211.7
27 2 88	211.7	28 2 88	211.6
29 2 88	211.5		
1 3 88	215.2	2 3 88	218.2
3 3 88	217.6	4 3 88	217.7
5 3 88	217.8	6 3 88	218.0
7 3 88	218.1	8 3 88	218.2
9 3 88	220.2	10 3 88	217.7
11 3 88	215.2	12 3 88	216.2
13 3 88	212.1	14 3 88	219.0
15 3 88	217.7	16 3 88	217.0
17 3 88	214.3	18 3 88	211.6
19 3 88	214.2	20 3 88	213.1
21 3 88	211.9	22 3 88	210.8
23 3 88	209.6	24 3 88	213.9
25 3 88	213.6	26 3 88	213.3
27 3 88	213.0	28 3 88	213.7
29 3 88	213.3	30 3 88	212.8
31 3 88	202.3		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 4 88	204.8	2 4 88	207.3
3 4 88	205.7	4 4 88	203.0
5 4 88	208.0	6 4 88	204.8
7 4 88	196.8	8 4 88	201.8
9 4 88	198.3	10 4 88	202.7
11 4 88	202.4	12 4 88	197.4
13 4 88	198.0	14 4 88	198.5
15 4 88	199.3	16 4 88	205.3
17 4 88	204.5	18 4 88	203.7
19 4 88	200.9	20 4 88	201.4
21 4 88	202.1	22 4 88	200.7
23 4 88	200.5	24 4 88	195.5
25 4 88	201.8	26 4 88	197.5
27 4 88	199.0	28 4 88	204.5
29 4 88	197.0	30 4 88	199.4
1 5 88	193.4	2 5 88	202.7
3 5 88	196.0	4 5 88	196.3
5 5 88	194.2	6 5 88	193.3
7 5 88	193.4	8 5 88	202.4
9 5 88	198.9	10 5 88	195.3
11 5 88	190.0	12 5 88	187.2
13 5 88	189.3	14 5 88	187.1
15 5 88	186.1	16 5 88	184.1
18 5 88	192.9	19 5 88	185.9
21 5 88	176.3	22 5 88	169.7
23 5 88	175.9	24 5 88	182.9
25 5 88	181.6	26 5 88	176.1
27 5 88	178.2		
3 6 88	170.1	5 6 88	176.2
6 6 88	183.4	9 6 88	184.0
11 6 88	181.5	13 6 88	172.9
14 6 88	176.3	15 6 88	175.3
16 6 88	170.0	17 6 88	181.9
18 6 88	178.1	19 6 88	175.5
20 6 88	176.9	21 6 88	169.8
23 6 88	175.6	24 6 88	174.6
27 6 88	180.5	28 6 88	173.8
29 6 88	184.0	30 6 88	187.3

Datum	Ts _z [K]	Datum	Ts _z [K]
1 7 88	185.4	2 7 88	173.3
3 7 88	176.2	4 7 88	180.1
6 7 88	174.4	8 7 88	175.0
10 7 88	179.2	11 7 88	181.8
12 7 88	181.0	13 7 88	178.9
14 7 88	179.9	20 7 88	181.5
25 7 88	182.8	26 7 88	178.9
28 7 88	184.1	29 7 88	188.2
30 7 88	182.7	31 7 88	185.4
1 8 88	193.2	2 8 88	185.4
4 8 88	190.7	5 8 88	187.7
6 8 88	190.6	7 8 88	195.6
8 8 88	195.5	9 8 88	193.4
10 8 88	194.1	11 8 88	202.3
12 8 88	189.5	13 8 88	195.7
14 8 88	197.0	15 8 88	198.0
17 8 88	196.2	18 8 88	199.6
19 8 88	198.2	21 8 88	196.3
23 8 88	197.2	24 8 88	198.6
25 8 88	209.9	28 8 88	201.0
29 8 88	202.3	30 8 88	207.7
31 8 88	217.9		
1 9 88	208.1	2 9 88	210.8
3 9 88	208.3	4 9 88	212.5
5 9 88	209.8	6 9 88	206.0
7 9 88	208.4	8 9 88	207.0
9 9 88	204.6	10 9 88	209.9
12 9 88	209.5	13 9 88	211.6
22 9 88	212.0	24 9 88	210.5
28 9 88	211.4	29 9 88	215.3
30 9 88	215.4		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 10 88	208.8	2 10 88	209.3
3 10 88	214.4	4 10 88	215.3
5 10 88	220.9	7 10 88	216.6
8 10 88	205.9	9 10 88	213.7
11 10 88	216.9	12 10 88	215.1
13 10 88	215.1	14 10 88	215.8
15 10 88	221.8	16 10 88	215.1
18 10 88	218.4	19 10 88	219.8
21 10 88	218.9	22 10 88	215.8
23 10 88	216.4	24 10 88	219.6
26 10 88	217.5	27 10 88	224.7
28 10 88	216.1	29 10 88	222.0
30 10 88	221.3	31 10 88	220.9
3 11 88	220.5	4 11 88	219.5
5 11 88	218.1	6 11 88	221.4
7 11 88	222.9	8 11 88	215.7
9 11 88	220.6	10 11 88	223.2
17 11 88	216.9	18 11 88	226.1
22 11 88	219.1	27 11 88	223.2
30 11 88	215.8		
4 12 88	216.8	7 12 88	222.1
8 12 88	225.4	10 12 88	229.7
16 12 88	227.0	21 12 88	240.3
25 12 88	241.0	29 12 88	219.9
11 1 89	236.1	12 1 89	232.9
13 1 89	234.0	14 1 89	233.5
15 1 89	230.0	19 1 89	228.4
20 1 89	228.8	21 1 89	232.7
23 1 89	234.1	24 1 89	227.7
25 1 89	225.5	26 1 89	222.7
27 1 89	219.1	28 1 89	217.6
29 1 89	215.1	31 1 89	216.8

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 2 89	221.1	3 2 89	217.0
4 2 89	218.8	5 2 89	215.7
7 2 89	215.4	8 2 89	214.2
9 2 89	218.0	10 2 89	216.9
11 2 89	219.6	12 2 89	223.1
13 2 89	221.0	14 2 89	227.4
15 2 89	223.6	17 2 89	221.0
21 2 89	221.1	22 2 89	230.9
23 2 89	231.7	24 2 89	220.5
25 2 89	216.6	26 2 89	237.7
27 2 89	218.7	28 2 89	216.6
1 3 89	222.6	3 3 89	218.1
5 3 89	221.0	6 3 89	212.9
7 3 89	213.2	9 3 89	210.1
11 3 89	211.4	14 3 89	205.3
15 3 89	213.8	16 3 89	210.7
18 3 89	209.2	19 3 89	208.9
20 3 89	215.2	21 3 89	221.7
30 3 89	206.8		
2 4 89	221.5	8 4 89	209.5
9 4 89	210.4	10 4 89	209.8
11 4 89	217.4	13 4 89	212.1
16 4 89	200.8	18 4 89	203.8
21 4 89	200.7	28 4 89	188.5
29 4 89	197.1	30 4 89	200.0
1 5 89	195.7	2 5 89	192.3
3 5 89	195.7	6 5 89	195.7
7 5 89	188.7	8 5 89	188.9
9 5 89	193.1	10 5 89	183.3
11 5 89	193.5	14 5 89	188.0
15 5 89	180.7	16 5 89	182.7
17 5 89	189.1	18 5 89	188.5
19 5 89	182.8	20 5 89	188.7
21 5 89	197.2	22 5 89	184.0
23 5 89	184.0	25 5 89	181.4
27 5 89	189.0	28 5 89	184.3
29 5 89	183.3	30 5 89	184.3
31 5 89	190.7		

Datum	Ts _z [K]	Datum	Ts _z [K]
1 6 89	178.4	2 6 89	176.9
3 6 89	176.2	4 6 89	180.3
6 6 89	173.2	7 6 89	186.2
8 6 89	177.3	10 6 89	175.1
12 6 89	174.9	15 6 89	177.4
16 6 89	180.1	17 6 89	179.0
18 6 89	175.1	19 6 89	177.6
20 6 89	180.9	21 6 89	173.2
23 6 89	177.8	24 6 89	182.2
25 6 89	184.4	26 6 89	178.7
27 6 89	177.4	28 6 89	183.6
30 6 89	187.2		
1 7 89	179.9	4 7 89	180.5
5 7 89	176.7	6 7 89	172.2
7 7 89	167.9	8 7 89	174.8
9 7 89	178.3	10 7 89	166.0
11 7 89	170.9	12 7 89	169.5
13 7 89	179.5	14 7 89	179.9
15 7 89	177.0	16 7 89	167.2
17 7 89	174.8	18 7 89	181.1
19 7 89	174.6	20 7 89	173.3
21 7 89	171.7	22 7 89	164.4
23 7 89	178.7	24 7 89	182.7
25 7 89	184.6	27 7 89	193.5
28 7 89	180.6	29 7 89	186.2
30 7 89	182.5		
1 8 89	204.6	2 8 89	189.8
3 8 89	175.4	5 8 89	180.9
6 8 89	180.2	7 8 89	186.6
9 8 89	182.9	10 8 89	186.2
11 8 89	192.3	13 8 89	191.2
14 8 89	189.3	15 8 89	185.5
16 8 89	185.3	18 8 89	188.1
19 8 89	194.5	20 8 89	196.1
21 8 89	193.6	22 8 89	197.9
23 8 89	196.2	24 8 89	202.8
25 8 89	205.1	27 8 89	198.4
28 8 89	195.0	29 8 89	199.0
30 8 89	204.8	31 8 89	207.3

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
2 9 89	205.9	3 9 89	206.0
4 9 89	206.8	5 9 89	210.4
6 9 89	206.5	7 9 89	203.7
8 9 89	203.3	9 9 89	206.7
10 9 89	209.7	11 9 89	214.9
12 9 89	212.6	13 9 89	215.1
17 9 89	216.3	18 9 89	213.9
19 9 89	213.1	20 9 89	209.0
21 9 89	208.7	22 9 89	209.8
23 9 89	210.5	26 9 89	208.5
27 9 89	206.6	28 9 89	207.5
29 9 89	211.0	30 9 89	201.6
4 10 89	208.5	5 10 89	208.3
6 10 89	211.8	10 10 89	216.2
11 10 89	214.6	12 10 89	215.5
13 10 89	212.5	14 10 89	212.8
15 10 89	215.0	16 10 89	215.0
17 10 89	213.9	18 10 89	213.0
19 10 89	215.3	20 10 89	216.8
22 10 89	217.5	23 10 89	221.9
24 10 89	216.7	25 10 89	217.6
26 10 89	221.0	27 10 89	225.0
28 10 89	215.6	29 10 89	215.0
31 10 89	219.7		
1 11 89	221.1	3 11 89	224.3
4 11 89	222.7	7 11 89	211.9
8 11 89	221.0	10 11 89	220.9
11 11 89	228.8	12 11 89	232.3
13 11 89	235.0	14 11 89	230.9
17 11 89	221.0	18 11 89	214.9
19 11 89	219.5	20 11 89	218.4
21 11 89	219.2	23 11 89	215.1
25 11 89	221.6	26 11 89	222.9
29 11 89	214.8	30 11 89	219.3
1 12 89	224.8	2 12 89	231.8
3 12 89	228.9	4 12 89	228.3
18 12 89	232.6	23 12 89	220.0
25 12 89	223.5	26 12 89	222.7

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
27 3 90	206.9	28 3 90	204.4
29 3 90	206.6	30 3 90	214.9
31 3 90	212.7		
1 4 90	215.0	2 4 90	213.9
4 4 90	212.3	5 4 90	210.1
6 4 90	210.8	7 4 90	207.9
9 4 90	211.1	10 4 90	205.9
12 4 90	204.4	14 4 90	207.5
15 4 90	206.0	16 4 90	202.1
17 4 90	209.9	18 4 90	199.8
19 4 90	199.2	20 4 90	196.2
21 4 90	196.8	22 4 90	198.8
23 4 90	202.3	24 4 90	204.0
25 4 90	200.9	26 4 90	196.0
27 4 90	206.0	28 4 90	198.4
29 4 90	204.3	30 4 90	197.4
1 5 90	197.2	2 5 90	194.4
3 5 90	197.2	4 5 90	191.8
5 5 90	196.6	6 5 90	200.5
7 5 90	201.2	8 5 90	196.7
9 5 90	191.6	10 5 90	196.6
11 5 90	195.4	12 5 90	192.8
13 5 90	203.8	14 5 90	197.2
15 5 90	192.2	16 5 90	195.5
17 5 90	190.3	18 5 90	189.4
19 5 90	184.8	20 5 90	192.9
21 5 90	192.2	22 5 90	197.3
24 5 90	187.7	25 5 90	180.8
26 5 90	181.6	27 5 90	181.7
28 5 90	183.6	29 5 90	176.9
30 5 90	176.6	31 5 90	179.4

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 6 90	183.4	2 6 90	188.1
3 6 90	178.8	5 6 90	186.4
8 6 90	207.8	9 6 90	188.7
12 6 90	199.3	13 6 90	184.7
15 6 90	195.8	16 6 90	186.3
17 6 90	174.7	18 6 90	179.8
19 6 90	182.0	20 6 90	183.5
21 6 90	183.0	23 6 90	178.4
25 6 90	192.3	26 6 90	179.0
27 6 90	184.5	28 6 90	181.9
29 6 90	180.0	30 6 90	176.0
1 7 90	181.4	2 7 90	180.7
4 7 90	183.0	6 7 90	175.6
7 7 90	180.5	9 7 90	189.8
10 7 90	180.5	11 7 90	175.1
12 7 90	177.8	13 7 90	181.0
14 7 90	190.2	15 7 90	183.7
16 7 90	188.3	17 7 90	188.3
19 7 90	182.7	20 7 90	183.0
21 7 90	184.0	23 7 90	190.6
24 7 90	191.4	26 7 90	181.8
27 7 90	183.1	28 7 90	190.9
29 7 90	196.7	30 7 90	190.4
31 7 90	189.6		
1 8 90	187.2	2 8 90	196.4
3 8 90	197.5	4 8 90	199.9
5 8 90	198.3	6 8 90	200.4
7 8 90	205.7	8 8 90	192.2
9 8 90	200.8	10 8 90	197.4
11 8 90	201.5	12 8 90	205.0
13 8 90	201.2	14 8 90	201.0
15 8 90	207.9	16 8 90	209.0
17 8 90	200.7	18 8 90	202.7
19 8 90	206.2	20 8 90	211.2
21 8 90	213.0	25 8 90	205.7
26 8 90	212.8	27 8 90	204.5
28 8 90	200.6	29 8 90	207.6
30 8 90	215.2		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
4 9 90	209.8	5 9 90	213.5
6 9 90	220.3	7 9 90	212.3
8 9 90	202.7	9 9 90	206.7
10 9 90	210.2	12 9 90	219.8
13 9 90	222.0	14 9 90	216.1
15 9 90	214.6	17 9 90	209.8
18 9 90	209.4	19 9 90	209.7
20 9 90	215.5	21 9 90	221.4
22 9 90	214.0	23 9 90	222.9
24 9 90	220.4	25 9 90	218.6
26 9 90	220.2	27 9 90	219.5
28 9 90	217.7	29 9 90	219.6
30 9 90	221.6		
1 10 90	217.8	2 10 90	223.4
3 10 90	223.1	4 10 90	224.8
5 10 90	226.1	7 10 90	228.6
8 10 90	220.4	10 10 90	216.0
16 10 90	222.6	17 10 90	225.7
18 10 90	221.7	19 10 90	221.4
20 10 90	223.8	21 10 90	223.2
22 10 90	223.0	23 10 90	223.5
24 10 90	227.7	25 10 90	229.7
26 10 90	227.6	27 10 90	224.7
28 10 90	231.1	30 10 90	228.8
31 10 90	229.0		
2 11 90	220.3	4 11 90	231.1
5 11 90	227.2	6 11 90	227.7
7 11 90	223.0	9 11 90	215.6
10 11 90	213.8	13 11 90	216.7
14 11 90	219.8	16 11 90	219.0
19 11 90	217.4	22 11 90	220.3
23 11 90	220.9	24 11 90	221.2
25 11 90	225.5	27 11 90	227.7
30 11 90	228.1		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 12 90	223.4	5 12 90	217.0
6 12 90	222.6	7 12 90	221.3
8 12 90	227.3	9 12 90	226.8
10 12 90	238.8	15 12 90	230.9
16 12 90	223.5	18 12 90	224.7
22 12 90	238.2	24 12 90	220.4
25 12 90	226.0	26 12 90	233.3
28 12 90	240.8	29 12 90	240.4
2 1 91	223.1	5 1 91	222.4
6 1 91	230.6	7 1 91	235.5
8 1 91	235.0	10 1 91	230.8
12 1 91	226.0	13 1 91	235.3
14 1 91	231.3	15 1 91	229.2
16 1 91	230.9	17 1 91	238.9
18 1 91	236.1	19 1 91	231.0
23 1 91	236.2	25 1 91	225.1
26 1 91	224.2	29 1 91	228.2
30 1 91	217.2	31 1 91	218.9
1 2 91	224.6	2 2 91	225.5
3 2 91	222.2	4 2 91	232.8
5 2 91	216.7	6 2 91	217.5
7 2 91	210.7	8 2 91	214.3
9 2 91	216.3	10 2 91	217.7
12 2 91	228.6	13 2 91	225.8
14 2 91	215.9	18 2 91	210.5
19 2 91	219.5	21 2 91	223.3
22 2 91	221.2	23 2 91	226.7
24 2 91	222.6	25 2 91	224.4
26 2 91	232.9	27 2 91	230.0
1 3 91	227.7	2 3 91	223.3
3 3 91	219.1	4 3 91	217.3
5 3 91	229.9	6 3 91	225.7
8 3 91	222.1	9 3 91	218.4
11 3 91	216.4	12 3 91	222.2
13 3 91	220.1	14 3 91	219.5
15 3 91	216.9		

Andoya, 69°N/16°O

Die Messungen vom 17.01.1990 bis zum 16.03.1990 wurden im Rahmen der DYANA-Kampagne durchgeführt.

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
17 01 90	221.1	18 01 90	206.4
19 01 90	211.8	20 01 90	216.5
21 01 90	214.7	22 01 90	216.2
23 01 90	225.1	24 01 90	232.7
25 01 90	236.0	26 01 90	228.7
27 01 90	224.7	28 01 90	216.5
29 01 90	214.7	30 01 90	209.2
31 01 90	203.0		
01 02 90	206.5	02 02 90	221.8
03 02 90	223.8	04 02 90	227.7
05 02 90	210.2	06 02 90	221.8
07 02 90	218.5	08 02 90	222.3
09 02 90	220.0	10 02 90	212.7
11 02 90	214.1	12 02 90	204.4
13 02 90	200.8	14 02 90	210.6
15 02 90	224.5	16 02 90	223.7
17 02 90	221.8	18 02 90	227.1
19 02 90	228.1	20 02 90	231.7
21 02 90	216.8	22 02 90	232.6
23 02 90	232.4	24 02 90	222.7
25 02 90	227.1	26 02 90	226.1
27 02 90	219.3	28 02 90	223.9
01 03 90	225.8	02 03 90	228.6
03 03 90	220.9	04 03 90	227.9
05 03 90	225.6	06 03 90	227.8
07 03 90	221.0	08 03 90	226.6
09 03 90	228.5	11 03 90	226.6
12 03 90	220.5	13 03 90	218.2
14 03 90	219.1	15 03 90	207.3
16 03 90	221.7		

Spektrometer II:

Untergrundkorrigierte Temperaturen, ab Juli 1989

(Wuppertal, 51°N/7°O)

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
25 7 89	184.6	27 7 89	193.5
28 7 89	180.6	29 7 89	186.2
30 7 89	182.5		
1 8 89	204.6	2 8 89	189.8
3 8 89	175.4	5 8 89	180.9
6 8 89	180.2	7 8 89	186.6
9 8 89	182.9	10 8 89	186.2
11 8 89	192.3	13 8 89	191.2
14 8 89	189.3	15 8 89	185.5
16 8 89	185.3	18 8 89	188.1
19 8 89	194.5	20 8 89	196.1
21 8 89	193.6	22 8 89	197.9
23 8 89	196.2	24 8 89	202.8
25 8 89	205.1	27 8 89	198.4
28 8 89	195.0	29 8 89	199.0
30 8 89	204.8	31 8 89	207.3
2 9 89	205.9	3 9 89	206.0
4 9 89	206.8	5 9 89	210.4
6 9 89	206.5	7 9 89	203.7
8 9 89	203.3	9 9 89	206.7
10 9 89	209.7	11 9 89	214.9
12 9 89	212.6	13 9 89	215.1
17 9 89	216.3	18 9 89	213.9
19 9 89	213.1	20 9 89	209.0
21 9 89	208.7	22 9 89	209.8
23 9 89	210.5	26 9 89	208.5
27 9 89	206.6	28 9 89	207.5
29 9 89	211.0	30 9 89	201.6

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
4 10 89	208.5	5 10 89	208.3
6 10 89	211.8	10 10 89	216.2
11 10 89	214.6	12 10 89	215.5
13 10 89	212.5	14 10 89	212.8
15 10 89	208.8	16 10 89	215.0
17 10 89	213.9	18 10 89	209.5
19 10 89	215.3	20 10 89	216.8
22 10 89	217.5	23 10 89	221.9
24 10 89	216.7	25 10 89	217.6
26 10 89	221.0	27 10 89	225.0
28 10 89	215.6	29 10 89	215.0
31 10 89	219.7		
1 11 89	221.1	3 11 89	224.3
4 11 89	222.7	7 11 89	211.9
8 11 89	221.0	10 11 89	220.9
11 11 89	227.6	12 11 89	232.3
13 11 89	235.0	14 11 89	230.9
17 11 89	221.0	18 11 89	214.9
19 11 89	219.5	20 11 89	218.4
21 11 89	219.2	23 11 89	215.1
25 11 89	221.6	26 11 89	222.9
29 11 89	214.8	30 11 89	219.3
1 12 89	224.8	2 12 89	231.8
3 12 89	228.9	4 12 89	228.3
18 12 89	232.6	23 12 89	220.0
25 12 89	223.5	26 12 89	222.7
27 3 90	206.9	28 3 90	204.4
29 3 90	206.6	30 3 90	213.5
31 3 90	212.1		

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 4 90	214.6	2 4 90	213.6
4 4 90	212.3	5 4 90	210.1
6 4 90	210.3	7 4 90	207.3
9 4 90	210.7	10 4 90	205.5
12 4 90	198.3	14 4 90	201.9
15 4 90	201.0	16 4 90	199.7
17 4 90	203.2	18 4 90	196.8
19 4 90	195.0	20 4 90	192.4
21 4 90	194.1	22 4 90	194.1
23 4 90	197.6	24 4 90	197.3
25 4 90	195.6	26 4 90	192.1
27 4 90	202.5	28 4 90	197.2
29 4 90	201.7	30 4 90	196.9
1 5 90	195.6	2 5 90	194.0
3 5 90	197.0	4 5 90	192.0
5 5 90	195.2	6 5 90	198.8
7 5 90	199.8	8 5 90	195.9
9 5 90	189.8	10 5 90	196.0
11 5 90	190.0	12 5 90	190.6
13 5 90	196.7	14 5 90	193.3
15 5 90	190.7	16 5 90	192.6
17 5 90	187.1	18 5 90	185.0
19 5 90	183.9	20 5 90	190.8
21 5 90	190.7	22 5 90	195.8
24 5 90	186.1	25 5 90	179.1
26 5 90	180.9	27 5 90	180.9
28 5 90	181.8	29 5 90	176.0
30 5 90	175.8	31 5 90	178.7
1 6 90	181.5	2 6 90	183.8
3 6 90	176.6	5 6 90	179.5
8 6 90	201.4	9 6 90	183.3
12 6 90	180.6	13 6 90	179.9
15 6 90	186.3	16 6 90	178.8
17 6 90	172.0	18 6 90	176.6
19 6 90	178.1	20 6 90	182.0
21 6 90	181.6	23 6 90	172.6
25 6 90	181.6	26 6 90	180.7
27 6 90	181.6	28 6 90	180.9
29 6 90	178.2	30 6 90	174.0

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
1 7 90	179.4	2 7 90	178.0
4 7 90	179.6	6 7 90	172.3
7 7 90	177.7	9 7 90	177.0
10 7 90	177.1	11 7 90	173.4
12 7 90	177.0	13 7 90	180.4
14 7 90	188.9	15 7 90	182.9
16 7 90	187.0	17 7 90	184.7
19 7 90	182.3	20 7 90	182.6
21 7 90	183.3	23 7 90	190.0
24 7 90	190.6	26 7 90	181.0
27 7 90	182.1	28 7 90	188.4
29 7 90	194.1	30 7 90	189.4
31 7 90	188.9		
1 8 90	185.7	2 8 90	195.6
3 8 90	196.7	4 8 90	199.4
5 8 90	197.4	6 8 90	199.2
7 8 90	202.3	8 8 90	191.2
9 8 90	199.7	10 8 90	195.9
11 8 90	199.5	12 8 90	203.9
13 8 90	199.4	14 8 90	199.8
15 8 90	205.5	16 8 90	204.4
17 8 90	199.0	18 8 90	201.4
19 8 90	197.8	20 8 90	208.4
21 8 90	202.5	25 8 90	204.5
26 8 90	210.2	27 8 90	203.5
28 8 90	200.3	29 8 90	207.0
30 8 90	214.0		
4 9 90	208.0	5 9 90	212.1
6 9 90	214.6	7 9 90	207.6
8 9 90	200.3	9 9 90	202.9
10 9 90	208.1	12 9 90	217.9
13 9 90	220.1	14 9 90	214.7
15 9 90	212.5	17 9 90	209.0
18 9 90	206.3	19 9 90	208.8
20 9 90	214.1	21 9 90	219.5
22 9 90	213.0	23 9 90	222.7
24 9 90	217.8	25 9 90	216.0
26 9 90	218.1	27 9 90	217.4
28 9 90	216.1	29 9 90	219.2

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
30 9 90	220.4		
1 10 90	216.4	2 10 90	222.9
3 10 90	220.7	4 10 90	222.4
5 10 90	225.6	7 10 90	225.7
8 10 90	220.5	10 10 90	217.0
16 10 90	218.4	17 10 90	222.4
18 10 90	219.4	19 10 90	219.9
20 10 90	221.8	21 10 90	221.1
22 10 90	221.8	23 10 90	222.6
24 10 90	226.9	25 10 90	228.5
26 10 90	225.9	27 10 90	223.6
28 10 90	238.9	30 10 90	225.4
31 10 90	227.8		
2 11 90	218.8	4 11 90	227.4
5 11 90	223.5	6 11 90	223.6
7 11 90	218.3	9 11 90	214.1
10 11 90	212.5	13 11 90	214.3
14 11 90	216.9	16 11 90	217.5
19 11 90	214.5	22 11 90	218.7
23 11 90	219.2	24 11 90	220.2
25 11 90	223.8	27 11 90	225.6
30 11 90	224.9		
1 12 90	221.2	5 12 90	215.3
6 12 90	220.1	7 12 90	218.8
8 12 90	222.8	9 12 90	223.4
10 12 90	231.0	15 12 90	224.6
16 12 90	221.5	18 12 90	222.1
22 12 90	230.3	24 12 90	213.3
25 12 90	215.3	26 12 90	231.6
28 12 90	237.8	29 12 90	235.8

Datum	Ts ₂ [K]	Datum	Ts ₂ [K]
2 1 91	218.4	5 1 91	219.7
6 1 91	228.8	7 1 91	230.8
8 1 91	230.8	10 1 91	225.4
12 1 91	223.8	13 1 91	232.5
14 1 91	229.6	15 1 91	226.2
16 1 91	227.3	17 1 91	238.4
18 1 91	235.7	19 1 91	231.0
23 1 91	234.6	25 1 91	219.0
26 1 91	219.3	29 1 91	220.0
30 1 91	214.0	31 1 91	217.3
1 2 91	219.7	2 2 91	222.9
3 2 91	221.2	4 2 91	231.8
5 2 91	216.8	6 2 91	217.3
7 2 91	210.4	8 2 91	214.4
9 2 91	215.6	10 2 91	214.8
12 2 91	223.3	13 2 91	225.6
14 2 91	215.8	18 2 91	210.1
19 2 91	219.2	21 2 91	222.5
22 2 91	219.8	23 2 91	223.9
24 2 91	222.6	25 2 91	223.1
26 2 91	230.2	27 2 91	228.9
1 3 91	220.4	2 3 91	222.3
3 3 91	217.4	4 3 91	216.2
5 3 91	228.6	6 3 91	224.0
8 3 91	218.5	9 3 91	218.4
11 3 91	214.8	12 3 91	220.1
13 3 91	219.3	14 3 91	218.6
15 3 91	214.9		

Ich versichere, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Hans-Helmut Graef