

INAUGURAL-DISSERTATION

am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn
zur Erlangung der Doktorwürde
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

Untersuchung neutraler und ionisierter Metallschichten in der oberen Atmosphäre am Beispiel von Calcium

von
Michael Gerding

Abstract: A comprehensive study of the upper atmosphere calcium atom and ion layers by groundbased lidars is presented in this work. From all the various metals residing in the atmospheric metal layer between 80 and 110 km, Ca is the only element which can be examined by groundbased lidar-technique in both its atomic and ionized form. We have measured density profiles of the Ca and the Ca⁺ layers during 112 and 58 nights, respectively. These observations were complemented by several Na and Fe soundings. The Ca column abundance was observed to have a maximum in autumn ($3.2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$) and a minimum in spring ($0.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$). At the layer maximum, the mean number density was 22 cm^{-3} . The seasonal variation of the ionized calcium layer (Ca⁺) is characterized by numerous short-time changes, mostly caused by so-called sporadic layers. Below 100 km altitude, an almost permanent Ca⁺ layer exists with peak densities of more than 5 cm^{-3} .

A one-dimensional, time-independent chemistry model was used to examine and interpret the properties of the Ca and Ca⁺ layers. Basic parameters of both layers were successfully approximated with the same set of rate coefficients. This includes the Ca⁺/Ca column density ratio of about 2 which is unusually high in comparison with other atmospheric metals.

The IAP lidars allow also to observe the metals in trails which have been released from ablating meteoroids. Out of about 200 Ca meteor trails there were only twelve corresponding with events in the simultaneously operating Fe lidar to measure both the Ca and Fe densities. All these events give a similar Ca/Fe ratio which is less than the solar system ratio by a factor of 6. This observed strong under-abundance of Ca in meteor trails was successfully modeled by E. Murad and W. J. McNeil under the assumption of differential ablation of the meteoroids.



**Untersuchung neutraler und ionisierter Metallschichten
in der oberen Atmosphäre
am Beispiel von Calcium**

von
Michael Gerding

**Dieser Forschungsbericht wurde als Dissertation von der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock
angenommen.**

**Gutachter: Prof. Dr. U. von Zahn (Universität Rostock)
Prof. Dr. E. Kopp (Universität Bern, CH)
Prof. Dr. K.-U. Großmann (Universität Wuppertal)**

verteidigt am: 4. April 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Entdeckung atomarer Metalle in der Atmosphäre.....	2
1.2	Motivation zur Untersuchung der Metallschicht.....	4
1.3	Übersicht über diese Arbeit.....	5
2	Die Funktionsweise des eingesetzten Resonanz-Lidars.....	6
2.1	Grundlagen des Lidars.....	6
2.2	Der Sendezweig des IAP-Doppellidars.....	9
2.3	Die Calcium-Dampfzelle	11
2.4	Der Empfangszweig	13
2.5	Die Datenaufnahme.....	14
3	Beobachtungen und Analysen der ungestörten Metallschicht	16
3.1	Der Jahresgang der Calcium- und Calcium-Ionen-Schichten	17
3.1.1	Variationen der Ca- und der Ca ⁺ -Schicht im Jahresverlauf.....	17
3.1.2	Harmonische Analyse wichtiger Parameter der Ca-Schicht	21
3.2	Das mittlere Profil der Ca- und Ca ⁺ -Schichten	23
3.2.1	Jahres- und Quartalsmittel der Ca- und Ca ⁺ -Schichten	23
3.2.2	Veränderungen in der Form der Ca-Schicht	26
3.3	Nächtliche Variationen der Ca-Schicht.....	28
3.3.1	Veränderungen der Säulendichte	28
3.3.2	Veränderungen der gesamten Ca-Schicht	29
3.4	Vergleich mit anderen Messungen und Diskussion der Beobachtungen	30
3.4.1	Die mittleren Ca- und Ca ⁺ -Schichten und ihre saisonalen Veränderungen.....	30
3.4.2	Interpretation der nächtlichen Variationen der Ca-Schicht.....	33
4	Modellierung der ungestörten Ca-Schicht	35
4.1	Die Funktionsweise des Ca-Modells.....	35
4.1.1	Der Modell-Formalismus.....	36
4.1.2	Vertikale und saisonale Verteilung von Metall-Eintrag und Diffusion.....	37
4.2	Das System der chemischen Reaktionen.....	38
4.2.1	Die Konzentrationen der Reaktionspartner.....	38
4.2.2	Die betrachteten Reaktionen und ihre Koeffizienten.....	39
4.2.3	Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Reaktionen.....	41
4.3	Ergebnisse des Ca-Modells	44
4.3.1	Die modellierten Ca- und Ca ⁺ -Schichten.....	44

4.3.2	Zusätzliche Anpassungen des Modells	46
4.4	Diskussion des Modells	47
4.4.1	Beschreibung der Lidar-Beobachtungen durch das Ca-Modell	47
4.4.2	Die verwendete Quelle der Metallschicht.....	49
4.4.3	Metall-Jahresgänge und andere Modell-Parameter im Vergleich	50
5	Beobachtungen und Analysen sporadischer Metallschichten	53
5.1	Beispiele sporadischer Ca- und Ca ⁺ -Schichten.....	53
5.1.1	Definition sporadischer Metallschichten	54
5.1.2	Beobachtungen am 3./4. November 1997.....	54
5.1.3	Beobachtungen am 7./8. April 1997	57
5.1.4	Beobachtungen sporadischer und „hoher“ Schichten am 1./2. August 1997 ..	59
5.2	Analyse sporadischer Ca- und Ca ⁺ -Schichten über Kühlungsborn.....	61
5.2.1	Die Höhenverteilung sporadischer Schichten.....	61
5.2.2	Saisonale Verteilung sporadischer und „hoher“ Ca-Schichten.....	62
5.3	Diskussion der Verteilung sporadischer Schichten.....	64
5.3.1	Die Höhenstrukturen sporadischer Ca- und Ca ⁺ -Schichten.....	64
5.3.2	Die saisonale Variation in der Verteilung sporadischer Schichten.....	66
5.4	Ergebnisse der Untersuchung sporadischer Ca- und Ca ⁺ -Schichten.....	68
5.4.1	Möglichkeiten der Entstehung sporadischer Schichten	68
5.4.2	Mögliche Höhendifferenzen bei der Entstehung von Ca _s aus der Rekombination von Ca ⁺ _s	69
5.4.3	Die Entstehung „hoher Ca-Schichten“ ohne Ca ⁺ _s -Schichten	71
5.4.4	Schwache sporadische Schichten als Besonderheit des atmosphärischen Calciums	71
6	Der Einfluß von Meteoroiden auf die Metallschicht	73
6.1	Grundlagen.....	73
6.1.1	Meteoroide und kosmischer Staub.....	73
6.1.2	Die Zusammensetzung von CI-Chondriten und der atmosphärischen Metallschicht	77
6.2	Beobachtung von Meteoroidenspuren mit dem Doppellidar	78
6.2.1	Automatische Erkennung von Meteoroidenspuren.....	79
6.2.2	Beispiele für die Beobachtung einzelner Spuren.....	81
6.2.3	Simultane Ca- und Fe-Spuren.....	82
6.2.4	Simultane Ca- und Ca ⁺ -Spuren.....	84
6.2.5	Berechnung von Metallkonzentrationen in Meteoroidenspuren.....	84
6.3	Interpretation der Lidar-Beobachtungen	87
6.3.1	Gleichzeitige Sondierung von Fe- und Ca-Ereignissen.....	88
6.3.2	Modelle zum Verdampfungsverhalten der neutralen Metalle	89

6.3.3 Gleichzeitige Sondierung von Ca- und Ca ⁺ -Ereignissen	91
6.3.4 Rückschlüsse auf die permanente Ca-Schicht	92
6.4 Diskussion	93
6.4.1 Lidar-Meteorspuren im Vergleich mit anderen Messungen	93
6.4.2 Differentieller und homogener Massenverlust.....	95
6.4.3 Weiterführende Untersuchungen	96
7 Ergebnisse und Ausblick.....	99
A Theoretische Grundlagen der Dichteberechnung.....	101
A.1 Berechnung des Hanle-Faktors	101
A.2 Berechnung des effektiven Rückstreuquerschnitts.....	103
A.3 Fehlergrenzen des Meßverfahrens.....	104
B Übersicht über die Sondierungen.....	106
B.1 Nacht-zu-Nacht-Variationen der Ca-Schicht	106
B.2 Beispiele für sporadische Ca- und Ca ⁺ -Schichten.....	108
B.3 Der Jahresgang der ungestörten Ca-Schicht.....	116
B.4 Statistik der Messungen	117
C Literaturverzeichnis	122
Danksagung	131

1 Einleitung

Die Atmosphäre der Erde befindet sich in einem komplexen physikalischen Gleichgewicht, das u.a. durch die Absorption solarer Strahlung, durch die Emission thermischer Strahlung und den Austausch von Materie mit dem Weltraum gesteuert wird. Die Atmosphäre ist dabei keine homogene Hülle, sondern sie besteht aus verschiedenen Schichten (Sphären), zwischen denen ein Austausch von Energie und Materie stattfindet. Eine mögliche Einteilung der Atmosphäre kann z.B. aufgrund des Temperaturgradienten erfolgen (siehe Abb. 1.1, linker Teil).

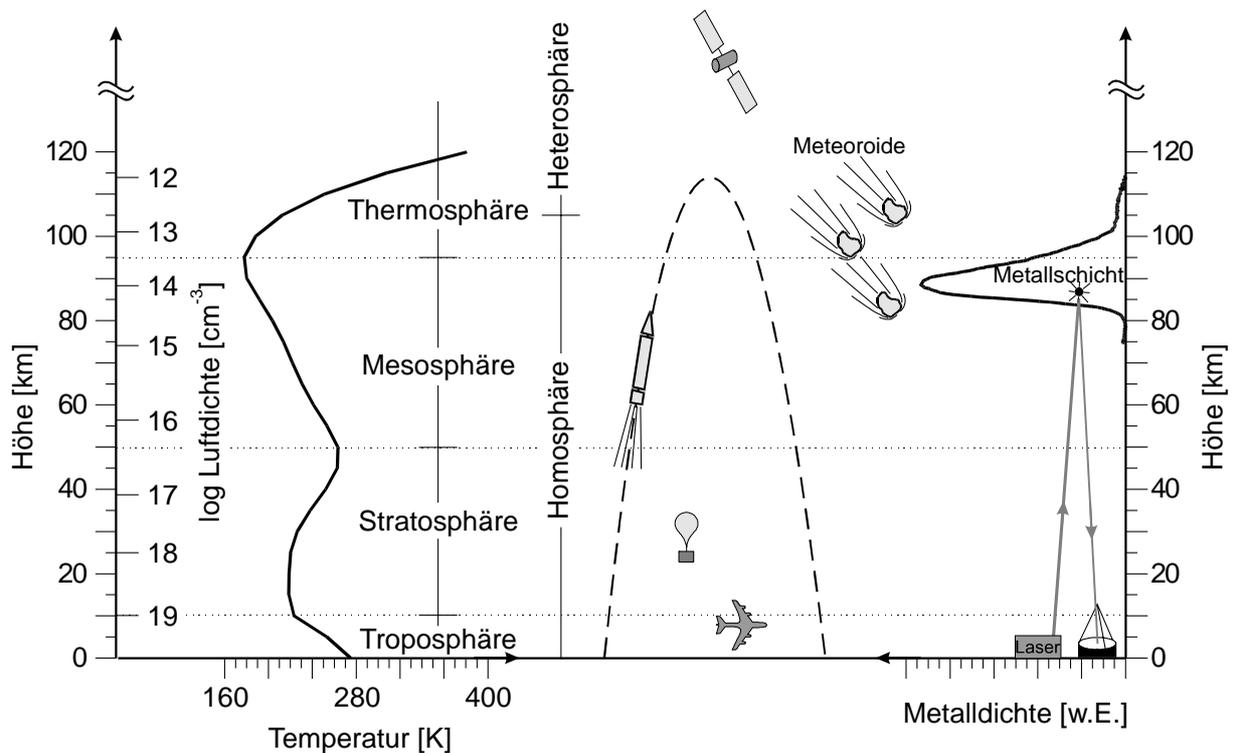


Abb. 1.1: Die Einteilung der Atmosphäre nach Temperatur und Durchmischung. Am rechten Rand ist eine typische Metallschicht als Ergebnis verdampfenden kosmischen Materials dargestellt (siehe Text). Verschiedene Untersuchungsmethoden für atmosphärische Parameter sind eingezeichnet. Die Temperaturdaten und die Luftdichte sind der Standardatmosphäre CIRA 86 als Jahresmittelwerte für 50°N entnommen [Fleming et al., 1990]

Während die Atmosphäre in Bezug auf die Temperaturstruktur und die Verteilung von Spurengasen wie Ozon, Wasserdampf, Kohlendioxid usw. inhomogen ist, ist das Mischungsverhältnis der Hauptbestandteile der Atmosphäre über große Höhen konstant: Bis in ca. 105 km Höhe wird der Anteil von Stickstoff (ca. 78%), Sauerstoff (ca. 21%) und Argon (ca. 1%) aufgrund turbulenter Diffusion im Gleichgewicht gehalten. Man bezeichnet diesen Höhenbereich deshalb auch als Homosphäre. In der darüber liegenden Heterosphäre sorgt molekulare Diffusion für eine Entmischung der Gase. Das Übergangsniveau bezeichnet man als Turbopause.

1.1 Entdeckung atomarer Metalle in der Atmosphäre

In der oberen Homosphäre entdeckte *Slipher* [1929] bei spektroskopischen Untersuchungen des Dämmerungsleuchtens eine Schicht atomaren Natriums. Das Dämmerungsleuchten entsteht bei der resonanten Streuung von Sonnenstrahlung in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre, d.h. in dem Höhenbereich mit den tiefsten Temperaturen der Atmosphäre (vgl. Abb. 1.1). Da tiefere Atmosphärenschichten bereits im Schatten liegen, ist die Rayleighstreuung an Luftmolekülen nur noch sehr schwach: Der Himmel erscheint nahezu schwarz und sorgt für einen geringen Signaluntergrund bei den spektrometrischen Messungen. Weitere Sondierungen ergaben bereits damals eine permanente Schicht von Metallen in diesem Höhenbereich. Die Metallschicht wird durch den Eintrag von täglich rund 110 t kosmischen Staubes verursacht [*Love und Brownlee*, 1991], der bei Eintritt in die Erdatmosphäre aufgrund der Erhitzung durch Luftreibung verdampft. Staubkörner mit Durchmessern größer als 1 mm leuchten beim Verdampfen auch für den visuellen Beobachter sichtbar auf (Sternschnuppen, *Meteore*). Der kosmische Staub enthält neben Nicht-Metallen wie Kohlenstoff vor allem Silicium und Eisen, daneben auch Na, K, Mg, Ca und weitere Metalle.

Aufgrund der Zusammensetzung des kosmischen Staubes erwartete man auch die Beobachtung von anderen Metall-Resonanzlinien wie z.B. von Eisen oder Calcium im Dämmerungsleuchten. Trotz hochauflösender Sondierungen ergaben die Messungen mit optischen Spektrometern aber kein Signal der Resonanzübergänge von Ca [*Gadsden*, 1969a]. Die Ca-Menge mußte damit mindestens zwanzigmal geringer sein, als man aus Vergleichen mit der gemessenen Na-Dichte erwarten konnte. Frühe Modelle der Metallschicht in der Mesopausenregion konnten diese Diskrepanz nicht erklären [*Gadsden*, 1970]. Erst Ende 1982 gelang erstmals der Nachweis atomaren Calciums in der Atmosphäre durch *Lidar-Sondierungen* in Frankreich [*Granier et al.*, 1985a].

Im Gegensatz zum Spektrometer stellt das Lidar ein aktives Fernerkundungsgerät dar. „Lidar“ steht für „light detection and ranging“. Das Meßverfahren ist mit dem *Radar* verwandt, allerdings nutzt man beim Lidar elektromagnetische Wellen des sichtbaren Spektralbereichs sowie des infraroten und nahen UV. Zur Untersuchung eines Metalls in der Metallschicht wird ein auf eine Resonanzwellenlänge des gesuchten Metalls abgestimmter, gepulster Laserstrahl in die Atmosphäre gelenkt. Das durch Resonanzstreuung zurückgestreute Signal wird mit einem Teleskop aufgefangen und zeitaufgelöst detektiert. Da der Rückstreuquerschnitt für Resonanzstreuung den für Molekülstreuung (Rayleighstreuung) um ca. 14 Größenordnungen übersteigt, bewirken die Metallatome ein großes zusätzliches Signal gegenüber der Streuung aller Luftmoleküle, die nur in geringeren Höhen von Bedeutung ist. Aus dem Rückstreusignal kann man die Teilchenzahldichte (Konzentration) des Metalls zeit- und höhenaufgelöst bestimmen. Dieses Meßverfahren wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzt. Im Kap. 2 wird es im Detail zusammen mit dem verwendeten Lidarsystem beschrieben.

Der Nachweis von Ca^+ -Ionen in der Mesosphäre und Thermosphäre gelang schon vor der Beobachtung der Atome. In den 50er Jahren entdeckte man bei der Untersuchung des Dämmerungsleuchtens Resonanzlinien von Ca^+ [*Vallance-Jones*, 1956]. Die Sondierungen

waren meistens nur nach Meteorschauern erfolgreich [Broadfoot, 1967], man beobachtete aber keine permanente Schicht um 95 km Höhe. Mit raketenge tragenen Ionen-Massenspektrometern wurde eine auf Ca^+ zurückgeführte Ionenschicht erstmals 1963 und seitdem in zwölf verschiedenen Experimenten erfolgreich sondiert [Istomin, 1963; Grebowsky et al., 1998]. Raketenge tragene Experimente bilden die einzige *in-situ*-Technik zur Untersuchung der Mesopausenregion. Flugzeuge und Ballone erreichen diese Höhe nicht, während Satelliten oberhalb von rund 300 km Höhe fliegen (siehe Abb. 1.1, Mitte). Die größere Empfindlichkeit der Raketen-Sondierungen ergab in allen Fällen Ca^+ -Ionenschichten, allerdings in sehr variablen Profilen. Derartige Experimente stellen aber nur Punktmessungen in Raum und Zeit dar. Eine räumliche oder zeitliche Auflösung erhält man nur durch Wiederholung der Raketen-Sondierungen, was jedoch zu nicht tragbaren Kosten führt. Im Gegensatz dazu sind mit dem Lidar – eine wolkenfreie Atmosphäre vorausgesetzt – Messungen über mehrere Stunden möglich.

Granier et al. [1985a] berichten von den ersten Lidar-Sondierungen von ionisiertem Calcium, die sie 1983 in Frankreich durchführten. Calcium bildet hier eine Ausnahme unter allen mesosphärischen Metallen, da nur hier auch die Ionen ausreichend starke, vom Erdboden aus erreichbare Resonanzwellenlängen besitzen. Die Absorption kurzwelliger Strahlung durch das stratosphärische Ozon macht Lidar-Sondierungen aller anderen Metall-Ionen unmöglich. Zeit- und höhen aufgelöste Messungen von Atomen und Ionen eines Metalls über mehrere Stunden geben sehr viel bessere Einblicke in die chemischen und dynamischen Abläufe in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre, als dies mit anderen Experimenten möglich ist. Erstmals wurden mit dem Doppellidar des Instituts für Atmosphärenphysik (IAP) über Juliusruh (Rügen) im Sommer 1995 beide Spezies simultan im selben Beobachtungsvolumen sondiert [Alpers et al., 1996], während in den bisherigen Veröffentlichungen ein einzelnes Lidar nacheinander Atome und Ionen untersucht hat [Granier et al., 1985a; Granier et al., 1989, Gardner et al., 1993]. Wie später gezeigt wird, sind die Konzentrationen von Ca und Ca^+ innerhalb einer einzelnen Nacht und von Nacht zu Nacht häufig sehr variabel, was die Interpretation nicht simultan gemessener Daten sehr erschwert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit dem IAP-Doppellidar an seinem neuen Standort in Kühlungsborn ein umfangreicher Datensatz simultan gemessener Ca/ Ca^+ -Profile gewonnen.

Abbildung 1.2 stellt die Vorgänge in der Metallschicht schematisch dar. Die durch verdampfende Meteoroiden in der Mesopausenregion deponierten Metalle werden durch chemische Reaktionen mit nicht-metallischen atmosphärischen Komponenten in Moleküle umgewandelt. Ladungsaustausch mit anderen Kationen sorgt für die Bildung von Metall-Ionen. Einzelne Moleküle sind chemisch sehr stabil, so daß sie eine Ca-Senke bilden. Durch Diffusion und Sedimentation werden diese relativ schweren Moleküle in tiefere Atmosphärenschichten und schließlich zum Erdboden transportiert.

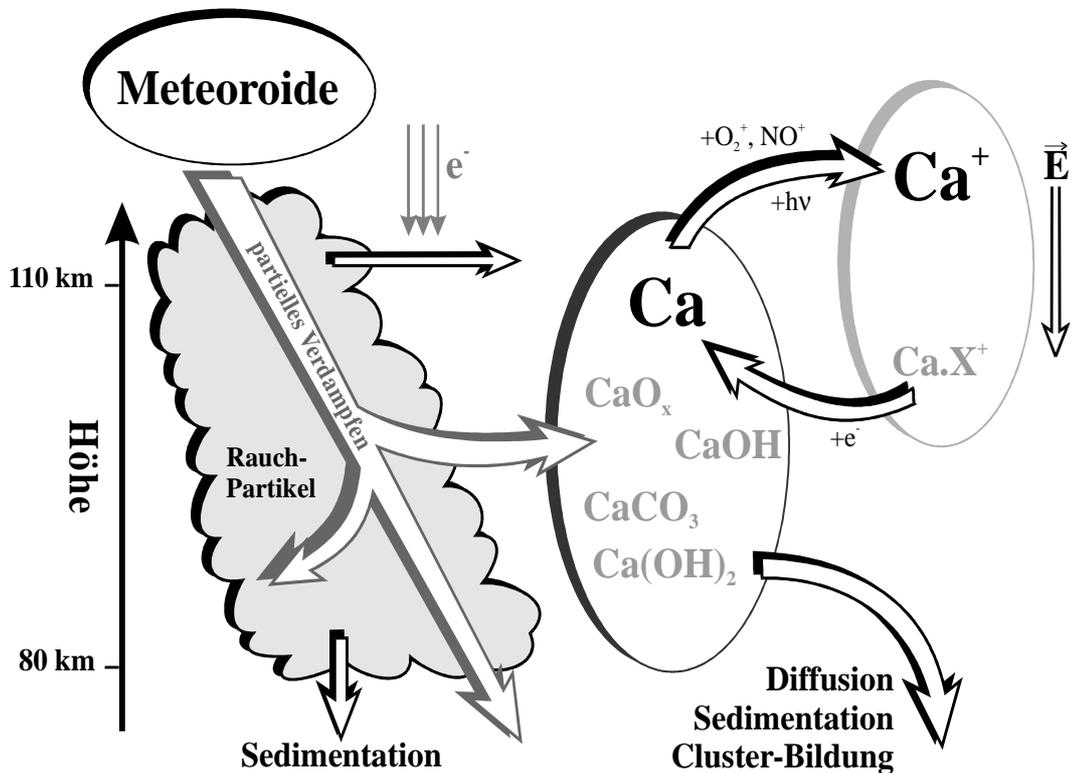


Abb. 1.2: Chemische und physikalische Vorgänge in der meso-/thermosphärischen Metallschicht am Beispiel von Calcium

1.2 Motivation zur Untersuchung der Metallschicht

Die Untersuchung der mesosphärischen Metallschicht gibt Einblicke in verschiedene Bereiche der Aeronomie und angrenzender Wissenschaften:

- Die Sondierung der Ablagerungsspuren von Meteoroiden auf verschiedenen Metall-Resonanzwellenlängen ist eine der genauesten Methoden zur Untersuchung der Zusammensetzung dieser Teilchen. Vergleiche der Metalldichten in den Ablagerungsspuren geben Hinweise auf die Vorgänge und die Zusammensetzung der Materie zur Zeit der Entstehung des Sonnensystems [Kerridge und Matthews, 1988]. Auch die Metallprofile können ohne Verständnis ihrer Quelle nicht vollständig erklärt werden.
- Schon in den 50er und 60er Jahren zeigte sich, daß zur Beschreibung der Metallschicht das einfache Bild verdampfender Meteoroiden nicht ausreicht. Die geringe Calcium-Menge im Vergleich zu anderen Metallen wie Natrium oder Eisen ist eine der grundlegenden offenen Fragen zum Verständnis mesosphärischer Metalle. Neben Erkenntnissen aus dem Verdampfungsverhalten soll die Metallchemie diese Fragen beantworten.
- Die Ionenschichten stehen in einer elektrisch neutralen Atmosphäre im direkten Zusammenhang mit freien Elektronen, die unter Einfluß des ionisierenden Teils der Sonnenstrahlung entstehen. Bei Ausbildung einer geschlossenen, dichten Schicht sind die Elektronen aufgrund ihrer Fähigkeit zur Reflexion kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung z.B. bei der Kurzwellenkommunikation über große Distanzen von allgemeinem Interesse. Die Korrelation starker Ionen- und Elektronenschichten ist seit

langem bekannt (siehe z.B. *von Zahn und Hansen* [1988], *Kwon et al.* [1988]), jedoch nicht vollständig verstanden. Die zeitaufgelöste Beobachtung neutraler und ionisierter Metallschichten kann hier weitere Hinweise geben.

- Mit geeigneten Lasersystemen lassen sich die Resonanzübergänge der Metalle spektral vermessen. Die Form der Resonanzlinie ist u.a. über die Dopplerverbreiterung direkt von der Temperatur abhängig. Über Temperaturmessungen im Höhenbereich der Metallschicht mit dem IAP-Kalium-Lidar berichten *von Zahn und Höffner* [1996] und *She und von Zahn* [1998].
- Die Metallschicht eignet sich außerdem zur Untersuchung atmosphärischer Gezeiten und Schwerewellen [*Gardner und Shelton*, 1985; *Hickey und Plane*, 1995; *Eska und Höffner*, 1998]. Diese besitzen in Höhe der Mesopause aus Gründen der Energieerhaltung sehr viel größere Amplituden als in bodennahen Schichten, in denen sie häufig angeregt werden.

1.3 Übersicht über diese Arbeit

In dieser Arbeit wird die Ca-Schicht auf der Grundlage 2-jähriger Lidar-Sondierungen mit ihren Quellen und Senken beschrieben. Nach einer Beschreibung der theoretischen Grundlagen und der Geräte im Kap. 2 folgt im Kap. 3 die Darstellung der mit dem IAP-Doppellidar durchgeführten Sondierungen. In insgesamt 112 Sondernächten zwischen dem 15.12.1996 und dem 31.12.1998 konnte ein wesentlich erweitertes Bild der mesosphärischen Ca-Schicht gewonnen werden. Simultan wurde jeweils ein weiteres Metall (Natrium oder Eisen) oder das Ca^+ -Ion untersucht. Die Beschreibung des Ca^+ -Datensatzes erfolgt ebenfalls im Kap. 3. In Zusammenarbeit mit Dr. Plane von der University of East Anglia in Norwich (GB) wurde ein eindimensionales Modell zur Beschreibung der Ca-Schicht entwickelt. Die Ergebnisse dieses Modells werden im vierten Kapitel vorgestellt und diskutiert. Häufig beobachtete schmale, schnell veränderliche Schichten von Ca und Ca^+ sind Gegenstand des fünften Kapitels. Der hier beschriebene Datensatz zeigt solche Schichten sehr viel häufiger, als bisher in der Literatur dokumentiert. Dies führt zu einer Diskussion der bisher bekannten und neuer Mechanismen zur Entstehung dieser besonderen Metallschichten. Bei den Sondierungen der atmosphärischen Metallschicht wurden außerdem mehrere hundert Verdampfungsspuren von Meteoroiden detektiert. Diese Untersuchungen gaben Einblicke in die beim Verdampfen innerhalb von nur rund einer Sekunde ablaufenden Prozesse. Durch die dabei gewonnenen Erkenntnisse konnten erstmals Teile der für die Modellierung erforderlichen Annahmen zur Quelle der Ca-Schicht gerechtfertigt werden.

2 Die Funktionsweise des eingesetzten Resonanz-Lidars

In der Einleitung wurden verschiedene alternative Verfahren zur Sondierung der atmosphärischen Metallschicht vorgestellt und die Ziele der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Lidar-Beobachtungen genannt. Bevor im Kapitel 3 mit der Darstellung der Beobachtungen und Ergebnisse begonnen wird, wird hier das verwendete Instrument eingeführt.

2.1 Grundlagen des Lidars

Emittiert man mit einem Laser einen kurzen Lichtpuls in die Atmosphäre, kann man mit einem geeigneten Empfänger ein zeitaufgelöstes Rückstreusignal empfangen. Über die Lichtgeschwindigkeit erhält man aus der Laufzeit des Signals eine Information über die Streuhöhe. Die Größe des Rückstreusignals hängt von verschiedenen gerätespezifischen Parametern (wie Teleskopfläche und Empfängerempfindlichkeit) und atmosphärischen Größen (wie Transmission der Atmosphäre und Rückstreuquerschnitt) ab. Allgemein wird die Intensität des Rückstreusignals $I(\lambda, r_i)$ durch die sog. *Lidargleichung* beschrieben:

$$I(\lambda, r_i) = I_0(\lambda) \cdot \frac{A}{4\pi r_i^2} \cdot T^2(\lambda, r_i) \cdot \Delta r \cdot \eta(\lambda) \cdot R(\lambda, r_i) \cdot \rho(r_i) + U \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnen

$I(\lambda, r_i)$ die bei der emittierten Wellenlänge λ aus der Höhe r_i empfangene Intensität,

$I_0(\lambda)$ die bei der Wellenlänge λ emittierte Intensität,

A die wirksame Teleskopfläche,

$T(\lambda, r_i)$ die Transmission zwischen Boden und Streuhöhe r_i ,

η die Detektorempfindlichkeit,

$R(\lambda, r_i)$ den Gesamt-Rückstreuoeffizienten der Streuer bei der Wellenlänge λ ,

$\rho(r_i)$ den geometrischen Überlapp zwischen Sende- und Empfangskeule,

U die empfangene, zeitlich unabhängige und damit höhenunabhängige Untergrundstrahlung wie Himmelsleuchten und Streustrahlung aus unteren Atmosphärenschichten.

In der Regel verwendet man an Stelle einer diskreten Höhe r_i ein Höhenintervall Δr von z.B. 200 m Dicke um die Höhe r_i . Der Raumwinkelfaktor $1/(4\pi r_i^2)$ berücksichtigt die Abnahme der Intensität mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle. Dieser Effekt tritt sowohl auf dem Weg zwischen Laser und Streuer als auch beim rückgestreuten Licht zwischen Laser und Empfangsteleskop auf. Auf dem „Hinweg“ des Lichts gleicht die quadratische Zunahme der ausgeleuchteten Atmosphärenfläche die Abnahme der Intensität durch das quadratische Entfernungsgesetz jedoch wieder aus. Auf dem „Rückweg“ ist dies nicht der Fall, da hier die beleuchtete Teleskopfläche konstant ist. Die Transmission $T(\lambda, r_i)$ wird vor allem durch die Trübung der Luft innerhalb der Troposphäre z.B. durch Wolken, Wasserdampf und Aerosole beeinflusst. Oberhalb der Tropopause beobachtet man einen abnehmenden Einfluß von Aerosolen. Absorption durch die Chappuis-Banden des Ozons (z.B. Shimazaki [1985]) muß vor

allem bei der Sondierung von Natrium bei 589 nm berücksichtigt werden, ist für die anderen Wellenlängen aber vernachlässigbar. Da jede Atmosphärenschiicht zweimal durchlaufen wird, tritt $T(\lambda, r_i)$ quadratisch in der Lidargleichung auf.

Der Rückstreukoeffizient $R(\lambda, r_i)$ setzt sich additiv zusammen aus den Rückstreukoeffizienten

- für die Rayleigh-Streuung (streuendes Teilchen ist viel kleiner als die Lichtwellenlänge, z.B. Luftmoleküle),
- für die Mie-Streuung (Größe des streuenden Teilchens ist in der Größenordnung der Lichtwellenlänge, z.B. Aerosole) und
- für die Resonanzstreuung (Lichtwellenlänge entspricht der zur elektronischen Anregung eines Atoms / Moleküls notwendigen Energie. Bei der Relaxation wird ein Photon der anregenden Wellenlänge emittiert.):

$$R(\lambda, r_i) = R_{Ray}(\lambda, r_i) + R_{Mie}(\lambda, r_i) + R_{Res}(\lambda, r_i) \quad (2.2)$$

Abbildung 2.1 zeigt ein typisches Rückstreuprofil nach Integration über 2000 Laserpulse, aufgenommen bei der Resonanzwellenlänge von Calcium (423 nm). Das Bild zeigt auf der logarithmischen Abszissenachse die Zahl der gezählten Photonen pro Höhenkanal (200 m) in Abhängigkeit von der Höhe. Unterhalb von 19 km wird das Signal durch einen *Chopper* geblockt (siehe Abschnitt 2.4). Die dort gezählten Photonen sind durch Mehrfachstreuung innerhalb des Nachweiszweiges am *Chopper* vorbei gelangt. Der exponentiell mit der Höhe abnehmende Teil dieser Zählrate wird durch Rayleighstreuung verursacht. Zusätzlich ist das Mie-Rückstreusignal durch Streuung an troposphärischen Wolken und bodennahen Aerosolen zu erkennen. In den untersten drei Kilometern liegt der Laserstrahl noch nicht vollständig innerhalb des Teleskopsichtfelds, so daß hier nur sehr geringe Zählraten beobachtet werden.

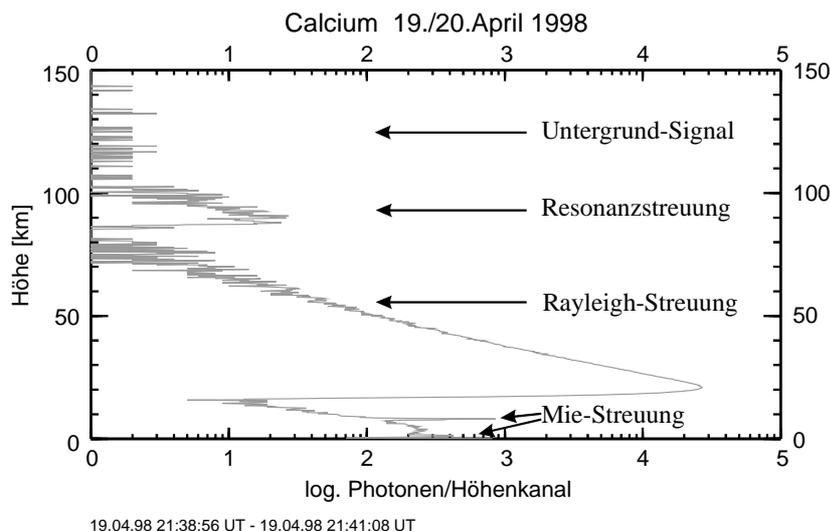


Abb. 2.1: Typisches Rückstreuprofil für eine Laserwellenlänge von 423 nm (Ca-Lidar) nach Integration über 2000 Laserpulse. Die in den verschiedenen Höhen dominierenden Streuprozesse (Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen in allen Höhen unter 80 km, Mie-Streuung an Aerosolen in der Troposphäre und Resonanzstreuung in der Metallschicht) sind eingezeichnet. Oberhalb der Metallschicht (ab ca. 105 km) ist das höhenunabhängige Untergrund-Signal erkennbar.

Die folgende Beschreibung der Berechnung von Metalldichten ist eine Zusammenfassung der in den Dissertationen von *von der Gathen* [1990] und *Alpers* [1993] enthaltenen Darstellung.

In der Lidargleichung (Gl. 2.1) sind verschiedene schwer meßbare Parameter wie z.B. die emittierte Intensität oder die Transmission der Atmosphäre zwischen Boden und Metallschicht enthalten. Man bedient sich zur Berechnung von Metalldichten aus dem Rückstreusignal daher eines vergleichenden Verfahrens, indem man die rückgestreute Intensität aus der Höhe r_1 innerhalb der Metallschicht auf die Intensität aus einer Höhe r_2 normiert. Die Normierungshöhe r_2 wird mit z.B. 30 km so gewählt, daß hier der Einfluß von Aerosolen (Mie-Streuung) ebenso vernachlässigt werden kann wie der von Metallen (Resonanzstreuung), die in dieser Höhe nicht beobachtet werden. Damit gilt $R(\lambda, r_2) = R_{Ray}(\lambda, r_2)$. Innerhalb der Metallschicht dominiert dagegen in der Regel die Resonanzstreuung über alle anderen Streuvorgänge (siehe Abb. 2.1), so daß in diesem Fall $R(\lambda, r_1) = R_{Res}(\lambda, r_1)$ gilt. Ersetzt man die Rückstreukoeffizienten $R(\lambda, r_i)$ durch die Produkte aus Rückstreuquerschnitt $\sigma(\lambda)$ und Teilchenzahl der Streuer $n(r_i)$

$$R(\lambda, r_i) = n(r_i) \cdot \sigma(\lambda) \quad (2.3)$$

so kann man den Quotienten der Intensitäten in den Höhen r_1 und r_2 schreiben als:

$$\frac{I'_{Res}(\lambda, r_1)}{I'_{Ray}(\lambda, r_2)} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \frac{n_{Metall}(r_1) \cdot \sigma_{Res,eff}(\lambda)}{n_{Atm}(r_2) \cdot \sigma_{Ray}(\lambda)} \cdot T_{Rest}^2(r_1 - r_2) \quad (2.4)$$

Die gestrichelten Größen bezeichnen hier die Intensitäten nach Untergrundabzug $I' = I - U$. Der Wert $T_{Rest}(r_1 - r_2)$ gibt die Resttransmission zwischen der Normierungshöhe r_2 und der Metallschicht (r_1) an. Sie kann meist in guter Näherung mit 1 angenommen werden, da oberhalb von 30 km nur in Ausnahmefällen (z.B. nach Vulkanausbrüchen) Aerosole beobachtet werden und die Absorption durch die *Chappuis-Banden* des Ozons nur Na-Sondierungen betrifft. Die Sondierung von Spurengasen wie mesosphärischen Metallen ist überhaupt nur möglich, da der Resonanzrückstreuquerschnitt der Metalle den der Rayleighstreuung um ca. 14 Größenordnungen überwiegt (vgl. Anhang A).

Die Luftdichte in der Normierungshöhe $n_{Atm}(r_2)$ wird Standard-Atmosphären wie der *CIRA 86* [Fleming et al., 1990] entnommen, der Rayleigh-Rückstreuquerschnitt $\sigma_{Ray}(\lambda)$ ist eine bekannte, konstante Funktion der Wellenlänge, der temperaturabhängige Resonanz-Rückstreuquerschnitt $\sigma_{Res}(\lambda)$ wird bei der Auswertung berechnet. Als Meßgrößen verbleiben die Intensitäten des Rückstreusignals, so daß sich die Metalldichte in der Höhe r_1 ergibt als

$$n_{Metall}(r_1) = n_{Atm}(r_2) \cdot \frac{1}{T_{Rest}^2(r_1 - r_2)} \cdot \frac{\sigma_{Ray}(\lambda)}{\sigma_{Res,eff}(\lambda)} \cdot \frac{r_1^2}{r_2^2} \cdot \frac{I'_{Res}(\lambda, r_1)}{I'_{Ray}(\lambda, r_2)} \quad (2.5)$$

Man bezeichnet diese Form auch als „effektive Lidargleichung“. Einzelheiten zur Berechnung des effektiven Rückstreuquerschnitts für Resonanzstreuung $\sigma_{Res,eff}(\lambda)$ werden im Anhang A beschrieben. Dort erfolgt auch eine Abschätzung des Dichtefehlers bei diesem Meßverfahren.

2.2 Der Sendezweig des IAP-Doppellidars

Das Metall-Doppellidar des Leibniz-Instituts für Atmosphärenphysik ist so konzipiert, daß ständig zwei Metallspezies simultan und im gleichen Atmosphärenvolumen beobachtet werden können. Hierzu werden zwei Farbstofflaser-Systeme von einem Excimer-Gaslaser simultan *gepumpt*. Abbildung 2.2 zeigt einen Überblick über den verwendeten Aufbau.

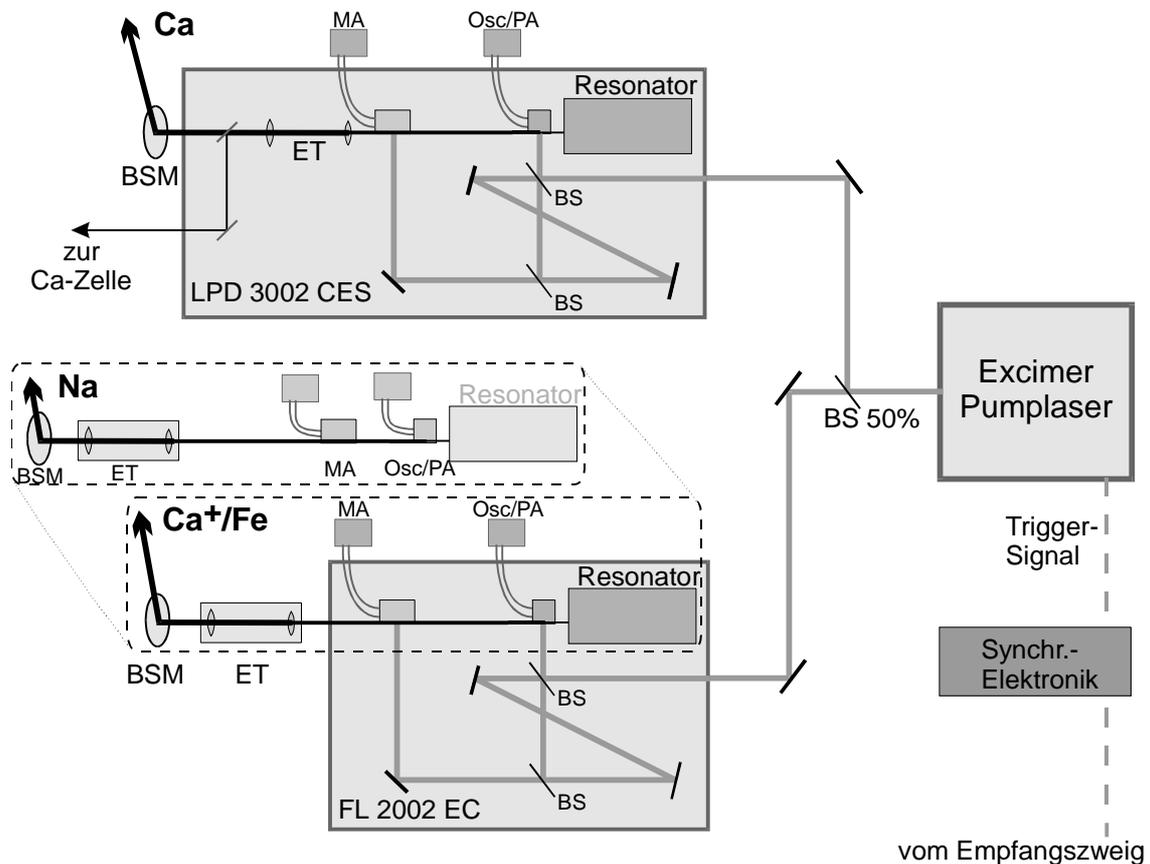


Abb. 2.2: Der Sendezweig des Metall-Doppellidars (BS: Strahlteiler, BSM: Strahlumlenk-Spiegel, ET: Aufweitungsteleskop, MA: Endverstärker, Osc/VV:Oszillator/Vorverstärker). Der gestrichelt eingerahmte Bereich markiert die Bauteile, die bei einem Wechsel zwischen Ca^+/Fe - und Na-Messungen ausgewechselt bzw. neu justiert werden müssen.

Im Excimer-Laser werden mit Hilfe einer Gasentladung und der Bildung angeregter XeCl-Dimere (engl. *Excited Dimers*) 10 ns lange Pulse kohärenten Lichts der Wellenlänge 308 nm erzeugt¹. Der Laserpuls wird anschließend mit einem unter 45° zur Strahlrichtung angeordneten Strahlteiler in zwei gleich intensive Wellenzüge aufgeteilt. Jeder dieser Pulse mit einer Energie von ca. 300 mJ wird in einen Farbstofflaser gelenkt und dient dort zur Anregung der Farbstoffe.

Die beiden Farbstofflaser bestehen aus je einer Oszillator- und zwei Verstärkerstufen, die auf jeweils zwei Farbstoffküvetten verteilt sind. Der Aufbau des einen Farbstofflasers ist in der Dissertation von *Alpers* [1993] im Detail beschrieben und soll hier nicht wiederholt wer-

¹ Seit dem 7./8. März 1999 wird anstelle des sehr wartungsintensiven Excimer-Lasers EMG 201 (Baujahr 1981) ein neuer Excimer-Laser LPX 305i mit einer Pulslänge von 25 ns und einer Repetitionsrate von 30 Hz eingesetzt, der beide Farbstofflaser mit mehr als 350 mJ pumpt.

2 Die Funktionsweise des eingesetzten Resonanz-Lidars

den. Der zweite Farbstofflaser ist nahezu identisch konstruiert. Der Farbstofflaserstrahl wird bei beiden Systemen hinter der zweiten Küvette mit einem Linsenteleskop aufgeweitet, um die Strahldivergenz auf jeweils 0,5 mrad zu reduzieren. Mittels eines steuerbaren Spiegels wird der nun 1-2 cm breite Laserstrahl um 90° in die Vertikale umgelenkt und durch eine Dachöffnung in die Atmosphäre geleitet. Aufgrund der Restdivergenz beträgt der Strahldurchmesser in 80 km Höhe ca. 40 m.

Im Meßbetrieb wurde der Farbstofflaser LPD 3002 bis auf eine Nacht auf der Resonanzwellenlänge von Calcium betrieben. Der zweite Farbstofflaser FL 2002 wurde nach Bedarf auf die Resonanzwellenlängen des Calcium-Ions, von Eisen- oder Natrium-Atomen abgestimmt. Der Wechsel zwischen Ca^+ und Fe ist dabei aufgrund der Nähe der verwendeten elektronischen Übergänge (393,3663 nm und 371,9937 nm Resonanzwellenlänge, siehe Tab. 2.1) in kurzer Zeit ohne Wechseln des Farbstoffes möglich. Die Resonanzwellenlänge von Natrium bei 588,9950 nm kann mit diesem Farbstoff jedoch nicht erreicht werden und erfordert einen Wechsel der Farbstoffküvetten. Ebenso wird in diesem Fall ein Wechsel verschiedener Bauteile des Lasers notwendig, die jeweils für feste Wellenlängen eingerichtet sind (siehe markierte Bauteile in Abb. 2.2).

Tab. 2.1: Technische Daten des Sendezweiges des Metall-Doppellidars

Gerätetyp	LPD 3002 CES		FL 2002 EC	
zu beobachtendes Metall	Ca	Ca ⁺	Fe	Na
LasermEDIUM	flüssiger Farbstoff			
	Stilben 3 in Methanol	Polyphenyl 2 in Ethylenglykol	Polyphenyl 1 oder Polyphenyl 2 in Ethylenglykol	Rhodamin 6G in Methanol
Wellenlänge (in Luft)	422,6728 nm	393,3663 nm	371,9937 nm	588,9950 nm
spektrale Breite	0,5 pm	0,5 pm	0,5 pm	0,5 pm
Laserenergie pro Puls	20 – 22 mJ	14 – 17 mJ	10 – 18 mJ	30 – 35 mJ
Pulslänge	10 ns (abhängig vom Pumplaser)			
Pulsfrequenz	15 Hz (abhängig vom Pumplaser)			
in Betrieb seit	15.12.1996	25.01.1997	25.04.1997	30.10.1997

Die Taktfrequenz des Sendesystems wird durch den Excimer-Laser vorgegeben. In den hier beschriebenen Sondierungen kam der alte Excimer-Laser (Bj. 1981) zum Einsatz, der mit höchstens 15 Hz betrieben werden konnte. Eine Randbedingung für das Auslösen des Pump-Laserpulses ist die Stellung eines mechanischen *Choppers* im Nachweiszweig (siehe Abschnitt 2.4), der die opto-elektronischen Sensoren vor Überlastung durch das Rückstreusignal aus den unteren Atmosphärenschichten schützen soll. Eine elektronische Steuerung berücksichtigt beide Bedingungen und *triggerte* den Excimer-Laser extern.

2.3 Die Calcium-Dampfzelle

Die wellenlängenselektiven Bauteile der Farbstofflaser werden über Schrittmotoren gesteuert. Als kleinste Schrittweite wurden Änderungsschritte von 0,1 pm (LPD 3002) oder 0,3 pm (FL 2002) verwendet. Die Reproduzierbarkeit der Absolut-Wellenlänge nach dem Einschalten liegt bei beiden Systemen jedoch nur bei ca. 40 pm. Damit ist es bei einer Laser-Halbwertsbreite von ca. 0,5 pm nicht möglich, die ungefähr gleich breiten Resonanzlinien der einzelnen Metalle routinemäßig anzufahren. Daher ist eine Absolut-Kalibrierung der Laserwellenlänge zu Beginn jeder Messung notwendig.

Eine Möglichkeit der Kalibrierung im Labor besteht in der optischen Anregung freier Atome der zu untersuchenden Metallspezies. Das Fluoreszenzlicht kann senkrecht zur Beleuchtungsrichtung detektiert werden und zeigt ein Maximum bei Anregung auf der Wellenlänge des atomaren Übergangs. Diese Technik wird bereits in verschiedenen Na- und K-Lidars eingesetzt (z.B. von der Gathen [1990], Eska [1998]). Zum Kalibrieren eines Farbstofflasers auf die Calcium-Resonanzwellenlänge wurde deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Ca-Dampfzelle entwickelt. Ein wesentliches Problem für die Herstellung dieser Zelle waren die hohen Schmelz- und Verdampfungstemperaturen von 1123 K bzw. 1760 K (bei Normalbedingungen). Handelsübliche Dampfzellen z.B. zur Kalibrierung von Halbleiterlasern sind meistens mit Alkalimetallen gefüllt, die einen im Vergleich zu Calcium niedrigen Schmelz- und Verdampfungspunkt besitzen (z.B. Kalium: 336,7 K / 1027 K). Es ist jedoch nicht notwendig, Dampfzellen für Fluoreszenzmessungen direkt bei den Verdampfungstemperaturen der jeweiligen Metalle zu betreiben. Bereits bei einer Temperatur von 500 K beträgt der Dampfdruck von Calcium ca. $3 \cdot 10^{-10}$ hPa [Nesmeyanov, 1963], was einer Konzentration von ca. 200.000 Atome/cm³ entspricht und für Fluoreszenzmessungen ausreicht. Bereits bei diesen Temperaturen sind die Anforderungen an die Heizung und an die Glaswandung der Dampfzelle aber weit aus höher als bei handelsüblichen Zellen.

Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau der am IAP eingesetzten T-förmigen Ca-Dampfzelle. Alle Schenkel der Zelle sind gegenüber herkömmlichen Dampfzellen verlängert, um ein Sublimieren des Dampfes an den kühleren Fenstern möglichst zu vermeiden [Röhe-Hansen und Helbig, 1992; Simonsen, 1992]. Zum Einstellen der Laserwellenlänge werden ca. 8% der Strahlenergie ausgekoppelt und über eine Glasfaser in die Dampfzelle eingestrahlt. Das Fluoreszenzsignal wird durch einen Photomultiplier gemessen und mit einem Oszilloskop angezeigt.

Die Ca-Dampfzelle wurde bei ca. 400 °C betrieben, da hier das Signal-Rausch-Verhältnis am größten war. Bei höheren Temperaturen ist zwar die Menge des verdampften Calciums größer, jedoch steigt auch die Infrarot-Hintergrundstrahlung der Heizschnüre. Außerdem stellten wir bei Temperaturen über 450 °C eine vermehrte Sublimation des Calciums an den optischen Fenstern fest. Die Halbwertsbreite der Ca-Resonanzlinie bei 423 nm beträgt bei einer Temperatur von 400 °C aufgrund der Doppler-Verbreiterung ca. 1,2 pm und ist damit ungefähr doppelt so groß wie die Breite der Laserlinie.

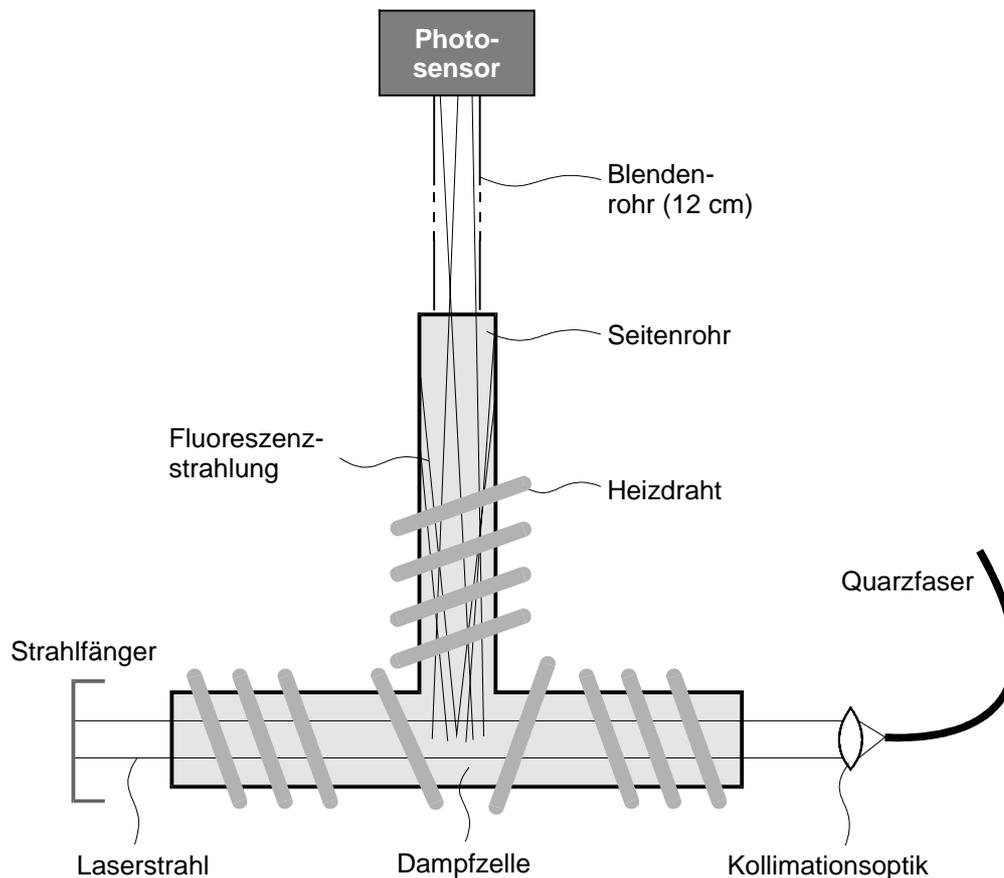


Abb. 2.3: Aufbau der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten T-förmigen Calcium-Zelle. Die Länge der eigentlichen Dampfzelle beträgt 15 cm (Querrohr) mit einem 10 cm langen, senkrecht dazu angebrachten Seitenrohr zum Beobachten der Fluoreszenz.

Für die übrigen mit dem Metall-Doppellidar untersuchten Metalle (Na, Fe, Ca⁺) standen keine Dampfzellen oder andere Kalibrierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Für diese Spezies mußte die korrekte Laserwellenlänge also anhand des Atmosphärensignals gefunden werden. Dazu wurde zu Beginn jeder Sondierung das Rückstreusignal aus der Metallschicht bei verschiedenen Wellenlängen im Abstand der kleinsten Schrittweite mit dem weniger wellenlängenabhängigen Rayleighsignal aus der Normierungshöhe (vgl. Gl. 2.5) verglichen. Das Ermitteln des größten Quotienten $I'_{Res}(\lambda, r_1) / I'_{Ray}(\lambda, r_2)$ gestaltete sich jedoch insbesondere bei Ca⁺-Sondierungen teilweise schwierig, da auch die schnell veränderliche Ionendichte Änderungen des Quotienten verursachte. Der Aufbau einer Resonanzzelle für Ca⁺-Ionen scheiterte jedoch an einer auch bei Wellenlängen unterhalb von 203 nm ausreichend starken UV-Strahlungsquelle. Diese Wellenlänge entspricht der Ca-Ionisierungsenergie von 6,1 eV und sollte für die Photo-Ionisation des Ca-Dampfes in der Ca-Zelle eingesetzt werden. Die Dampfzelle ist zu diesem Zweck bereits mit einem Fenster aus UV-durchlässigem Quarz hergestellt worden, das auch Wellenlängen unterhalb von 200 nm noch ausreichend transmittiert. Daneben wurden Versuche mit einer Ca-Hohlkathodenlampe unternommen, um den opto-galvanischen Effekt bei der resonanten Einstrahlung von Laserlicht auszunutzen [Goldsmith und Lawler, 1981; Barbieri et al., 1990]. Die dabei entstehenden Spannungsänderungen innerhalb der Lampe sind jedoch sehr klein und bei den verwendeten kurzen, energetisch variablen Laserpulsen nicht vom Rauschen zu trennen.

2.4 Der Empfangszweig

Der Nachweiszweig des Metall-Doppellidars ist in Abb. 2.4 skizziert. Das Empfangsteleskop besteht aus sieben gedrehten, parabolischen Aluminiumspiegeln von je 50 cm Durchmesser und 120 cm Brennweite. Gedrehte Aluminiumspiegel sind bei guten optischen Eigenschaften in der Anschaffung sehr viel günstiger als Glasspiegel. Der Einsatz mehrerer kleiner Spiegel erhöhte die Flexibilität bei der Aufteilung der Teleskopfläche zwischen dem Doppellidar und dem parallel betriebenen IAP-Rayleigh-Mie-Raman-Lidar (RMR-Lidar, vgl. *Alpers et al.* [1999a]). Zu Beginn der Metall-Beobachtungen im Dezember 1996 standen maximal fünf Einzelspiegel zur Verfügung. 1997 wurden dann drei weitere, baugleiche Spiegel angeschafft, wobei seitdem Spiegel (1) ausschließlich dem RMR-Lidar und die Spiegel (6) bis (8) ausschließlich dem Doppellidar zur Verfügung stehen. Die Zuordnung der Spiegel (2) bis (5) erfolgt nach Bedarf. Das Licht jedes Spiegels wird in eine Faser eines 7-adrigen Quarzfaserbündels fokussiert und dem Detektorsystem zugeleitet. Der Faserdurchmesser beträgt je 0,65 mm, die numerische Apertur 1,2.

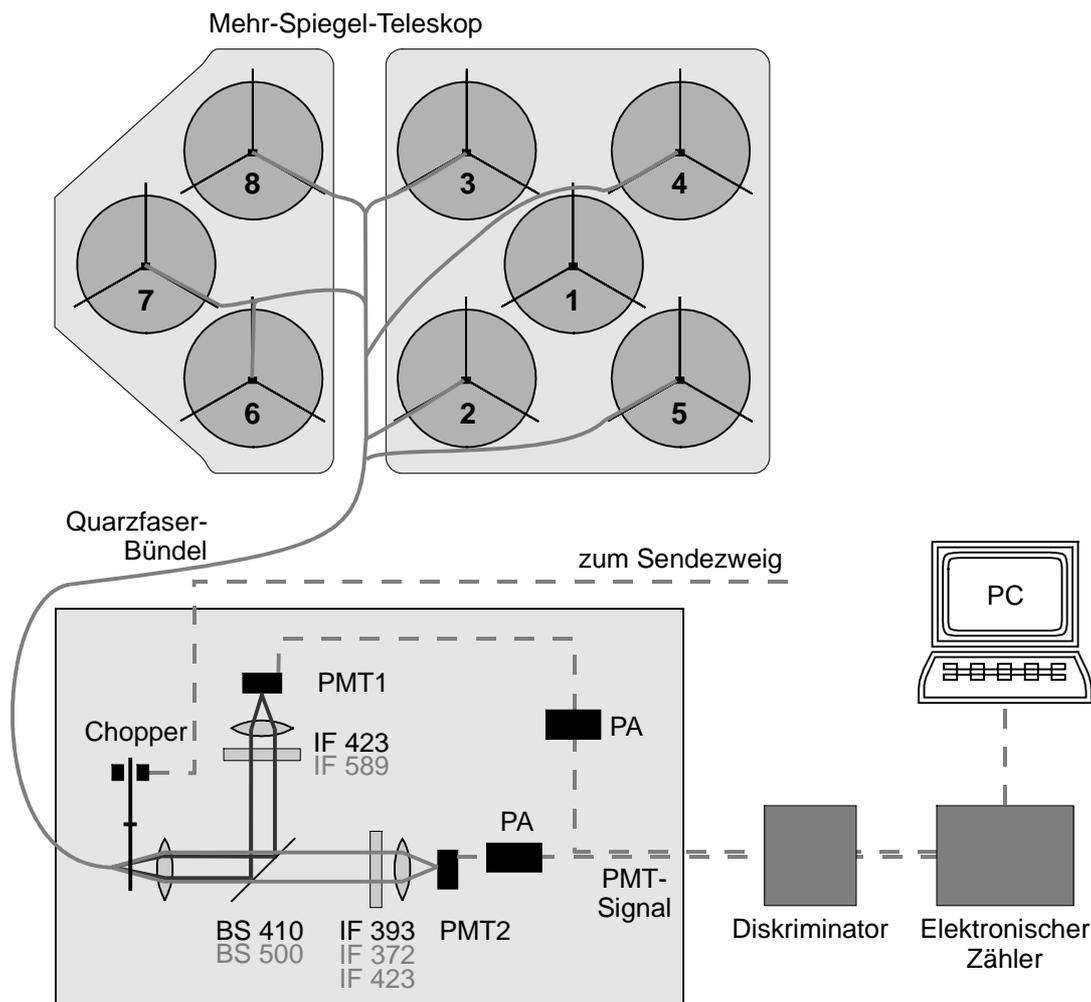


Abb. 2.4: Der Empfangszweig des Metall-Doppellidars (BS: dichroidische Strahlteiler, IF: Interferenzfilter, PMT: Photomultiplier, PA: Vorverstärker)

Das Quarzfaserbündel endet vor einer optischen Bank, in der zunächst das Rückstreuungssignal aus den unteren Atmosphärenschichten (bis ca. 19 km) mit Hilfe eines schnelldrehenden vierflügeligen Rades (*Chopper*) geblockt wird. Der *Chopper* löst dazu bei bestimmten Flügelstellungen über eine Lichtschranke und eine Synchronisationselektronik den Excimer-Laserpuls so aus, daß ein Flügel des Rades die Glasfaser zum passenden Zeitpunkt abdeckt. Nachdem das empfangene Licht den *Chopper* passiert hat, wird es kollimiert. Ein dichroidischer Strahlteiler trennt die von den beiden untersuchten Metallspezies rückgestreuten Photonen in zwei verschiedene Nachweiskanäle. Interferenzfilter in beiden Kanälen mit Halbwertsbreiten von ca. 1 nm und Unterdrückungen in den Flügel von 10^{-5} bis 10^{-6} blocken einen Großteil des Untergrundlichtes. Anschließend werden die Photonen auf Photomultiplier fokussiert. Schiebehalterungen ermöglichen einen schnellen Wechsel der Interferenzfilter für die Metallspezies Fe und Ca^+ . Beim Wechsel von und zu Natrium-Sondierungen muß zusätzlich der dichroidische Strahlteiler gewechselt und neu justiert werden.

Trotz des Einsatzes schmalbandiger Interferenzfilter waren nur Nachtmessungen möglich. Zusätzlich benötigt man zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses ein kleines Teleskop-Gesichtsfeld (hier 0,54 mrad) und eine entsprechend geringe Laserdivergenz (hier 0,5 mrad). Trotzdem kann im Extremfall in mond hellen Nächten z.B. bei Ca-Sondierungen der Untergrund ein Viertel des Gesamtsignals in einem Höhenkanal betragen. Aufgrund der geringen Photonennrate (siehe Tab. 2.2) werden die Photomultiplier nicht im Strommodus, sondern als Einzelphotonenzähler betrieben. Die Photoneneffizienz liegt bei 20 bis 22% (Ca, Ca^+ , Fe) bzw. 7% (Na).

Tab. 2.2: Typische Werte des IAP-Doppellidars für die Zahl der rückgestreuten Photonen pro Laserpuls mit sieben Empfangsspiegeln

Photonenzahl aus:	Ca	Ca^+	Fe	Na
30 km Höhe [km^{-1}]	15	12	13	3
Metallschicht [km^{-1}]	0,1-0,3	<0,1	0,1-0,3	0,6-1,2

2.5 Die Datenaufnahme

Die Standard-Datenaufnahme des Metall-Doppellidars läuft über zwei elektronische Zähler, die getrennt für jeden Empfangskanal die innerhalb eines Zeitfensters von ca. $1,3 \mu\text{s}$ (entsprechend 200 m Höhenauflösung) detektierten Photonen summieren. Jeder Zähler nimmt 750 Höhenkanäle auf, was einer größten Signalthöhe von 150 km entspricht. Diese Daten werden nach jedem Laserpuls an einen PC mit der Auswerte-Software übergeben.

Seit Anfang 1998 wird im Metall-Doppellidar eine weitere Zähllektronik eingesetzt, die nicht mit festen Höhenkanälen arbeitet, sondern die geringe Photonennrate aus der Metallschicht ausnutzt: Zu jedem detektierten Photon wird die Empfangszeit und damit die Strehöhe aufgezeichnet. Der Zähler arbeitet mit einer Höhenauflösung von 7,5 m. Innerhalb dieses Höhenbereichs kann nur je ein Photon registriert werden.

Die Daten der insgesamt vier Zähler werden von der Auswerte-Software gesammelt und nach jeweils 2000 Pulsen (ca. 2,2 min) in sechs verschiedenen Rohdatendateien gespeichert. Getrennt für jeden Empfangskanal erhält man drei Dateien mit unterschiedlichem Informationsinhalt:

1. Eine Datei (*Summendatei*) mit dem über 2000 Laserpulse integrierten Rückstreusignal (Höhenauflösung 200 m, ASCII-Code),
2. Eine weitere Datei (Einzelpuls-Datei) mit dem Rückstreuprofil jedes einzelnen Laserpulses in binärer Form. Aufgenommen werden hier die pro Höhenkanal gezählten Photonen bei einer Höhenauflösung von 200 m.
3. Eine Binär-Datei (Meteor-Datei) mit dem Rückstreuprofil jedes einzelnen Laserpulses bei einer Höhenauflösung von 7,5 m (seit Januar 1998). Gespeichert wird hier die Höhe jedes einzelnen registrierten Photons.

Die Einzelpuls-Profile aus *Einzelpuls-Datei* und *Meteor-Datei* werden zum Erkennen von Spuren verdampfender Meteoroiden eingesetzt, die meist nur für wenige Sekunden im Lidar sichtbar sind (siehe Kap. 6). Die integrierten Profile der *Summendatei* werden zum Berechnen von Metallichten nach Gleichung 2.5 verwendet.

3 Beobachtungen und Analysen der ungestörten Metallschicht

Das Metall-Doppellidar des Instituts für Atmosphärenphysik wurde ursprünglich 1994 in der Außenstelle des IAP in Juliusruh auf der Insel Rügen aufgebaut und dort bis 1996 betrieben [Alpers *et al.*, 1996]. Im Sommer 1996 wurde das Gerät in Juliusruh demontiert und im Neubau des IAP in der im Kapitel 2 beschriebenen Form installiert. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit am Gerät durchgeführten Tätigkeiten beziehen sich nur auf die Zeit nach dem Umzug und beinhalten die endgültige Justage, die Durchführung des Meßbetriebs, die Wartung des Systems sowie die Auswertung der Beobachtungen.

Zwischen dem 15.12.1996 und dem 31.12.1998 wurden mit dem IAP-Doppellidar in insgesamt 113 Nächten Sondierungen der atmosphärischen Metallschicht jeweils zweier unterschiedlicher Spezies vorgenommen:

- Zwischen dem 15.12.1996 und dem 31.12.1998 wurden in 112 Nächten Sondierungen der Ca-Schicht durchgeführt.

Parallel dazu fanden mit dem zweiten Lasersystem seit der Inbetriebnahme am 25.01.1997 folgende Messungen statt (jeweils bis zum 31.12.1998):

- Ca^+ -Sondierungen in insgesamt 58 Nächten,
- seit dem 25.04.1997 insgesamt 24 Fe-Sondierungen sowie
- Beobachtungen der Na-Schicht in insgesamt 23 Nächten ab dem 30.10.1997.

Die einzelnen Meßnächte und untersuchten Metallspezies sind im Anhang B tabelliert. Die Darstellung in diesem und den folgenden Kapiteln bezieht sich im wesentlichen auf die Messungen von Calcium-Atomen und -Ionen als zentrale Punkte dieser Arbeit.

Die Messungen mit dem IAP-Doppellidar wurden auch im Frühjahr und Sommer 1999 fortgesetzt. Aufgrund von Reparaturen und der Installation eines neuen Excimer-Lasers ergab sich eine Meßpause zwischen Anfang Januar und Mitte März 1999. Danach wurden die Sondierungen der Mesopausenregion fortgesetzt. Erste Auswertungen zeigen, daß die dabei gewonnenen Daten mit dem hier beschriebenen Datensatz 12/96–12/98 konsistent sind.

Nach einer Klärung der wichtigsten Begriffe und Besonderheiten der Ca-Sondierungen wird in diesem Kapitel ein Überblick über alle Ca- und Ca^+ -Sondierungen gegeben. Anschließend erfolgt eine Beschreibung nächtlicher Variationen der Schichtparameter der Ca-Schicht, die nach Mittelung über mehrere Sondierungen erkennbar werden. In der Diskussion (Abschnitt 3.4) werden Vergleiche mit anderen Ca-Sondierungen und anderen Metallen gezogen.

In den Veröffentlichungen über mesosphärische Metalle wie Natrium, Eisen, Kalium etc. wird meistens zwischen einer „ungestörten“, im chemischen Gleichgewicht befindlichen Schicht und einer z.B. durch sog. „sporadische“ Schichten gestörten Schicht unterschieden [Megie und Blamont, 1977; Alpers *et al.*, 1990; Bills und Gardner, 1990; Eska *et al.*, 1999]. *Sporadische Schichten* sind schmale Bereiche erhöhter Metaldichte mit nur 2 bis 5 Kilometern Halbwertsbreite. Im Kap. 5 wird gezeigt, daß sporadische Ionenschichten unterhalb von 100 km Höhe häufig mit *neutralen* sporadischen Schichten korrelieren. Im folgenden werden

sporadische Ca-Schichten mit Ca_S und sporadische ionisierte Schichten mit Ca^+_S bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen „gestörten“ und „ungestörten“ Nächten setzt sich in den Veröffentlichungen über die Calcium-Schicht fort, die insgesamt 32 Meßnächte [Granier et al., 1989], 8 Nächte [Qian und Gardner, 1995] und 6 Nächte [Alpers et al., 1996] beschreiben. Der hier beschriebene, mit 112 Beobachtungsnächten deutlich umfangreichere Datensatz zeigt dagegen in der Regel keine z.B. für eine Jahreszeit typische Calcium-Schichtform. So unterlag die Ca-Dichte von einer Nacht zur nächsten oft Schwankungen von 50-100% oder mehr (vgl. Anhang B.1). Auch die Schichtform veränderte sich innerhalb einer Nacht und im Vergleich mehrerer aufeinanderfolgender Nächte oft stark.

3.1 Der Jahresgang der Calcium- und Calcium-Ionen-Schichten

Aus insgesamt 112 Ca-Sondierungen und 58 Ca^+ -Sondierungen am Standort Kühlungsborn konnte ein Bild der Metallschicht und ihrer saisonalen Veränderungen ermittelt werden. In vielen Nächten wurden neben einer permanenten Ca-Schicht auch die bereits erwähnten und im Kap. 5 ausführlich beschriebenen sporadischen Schichten beobachtet. Da man in Ca_S -Nächten nicht vom chemischen und dynamischen Gleichgewicht innerhalb der Metallschicht ausgehen kann, werden in diesem Kapitel im Hinblick auf die spätere Modellierung der permanenten Metallschicht (Kap. 4) teilweise nur die insgesamt 66 Nächte ohne sporadische Ca-Schichten betrachtet.

Bei der Betrachtung der Calcium-Ionen ist eine Trennung zwischen Nächten mit und ohne Einfluß sporadischer Schichten nicht sinnvoll, da Ca^+ in der unteren Thermosphäre meistens in Form sehr variabler Schichten beobachtet wird. Diese zeigen in der Regelmäßigkeit ihres Auftretens Eigenschaften einer permanenten Schicht, weshalb im Abschnitt 3.1.1 der Begriff *quasi-permanente Schicht* eingeführt wird. Die große Variabilität weist aber auch auf die Nähe zu sporadischen Ca^+ -Ionenschichten hin. Eine Beschreibung der mittleren Ca^+ -Ionenschicht muß darum immer die Nächte mit Ca^+_S einschließen.

3.1.1 Variationen der Ca- und der Ca^+ -Schicht im Jahresverlauf

Ca-Atome: Mit den durchgeführten 112 Ca-Sondierungen wurden insgesamt zwei Beobachtungsjahre abgedeckt. Dabei gelangen rund zwei Drittel aller Sondierungen im ersten Jahr. Im zweiten Jahr war die Beobachtungssituation aufgrund des Wetters deutlich schlechter. Die hierbei gewonnenen Profile bestätigen aber den Datensatz des ersten Jahres, so daß alle Sondierungen zu einem repräsentativen Jahresgang zusammengefaßt werden können.

Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht über die Ca-Sondierungen am Standort Kühlungsborn. Die einzelnen Nachtmittel wurden dazu nach Monat und Tag geordnet. Zum Hervorheben der jahreszeitlichen Variationen und Unterdrücken der Phänomene mit Perioden von weniger als einem Vierteljahr wurden die Daten anschließend mit einem laufenden, symmetrischen 91-Tage-Hanning-Filter geglättet [Press et al., 1992]. An Tagen, für die kein beobachtetes Profil vorliegt, wurde hierdurch aus den umliegenden 90 Tagen ein Profil interpoliert. Bei einem Jahreswechsel innerhalb der 91-Tage-Periode wurde der Filter zyklisch weitergeführt, um Unstetigkeiten zwischen Dezember und Januar zu vermeiden.

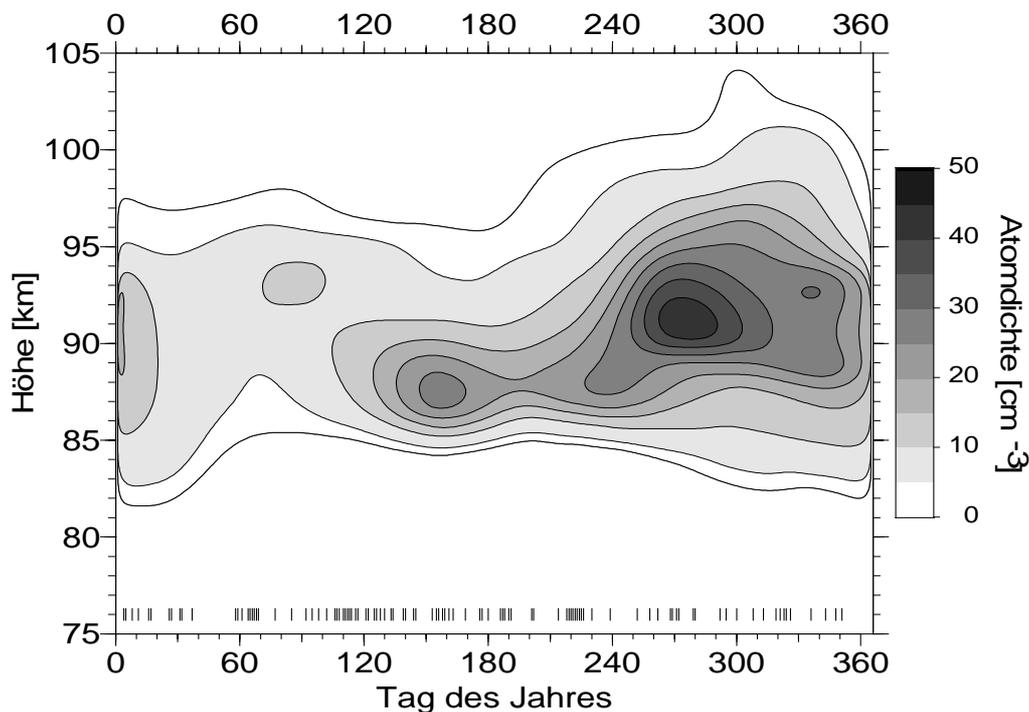


Abb. 3.1: Jahreszeitliche Variationen der Ca-Schicht. Die einzelnen Sondierungen wurden mit einem 91-Tage-Hanning-Filter interpoliert und in der Höhe über 1,8 km geglättet. Die Linien über der Abszisse markieren die einzelnen Sondierungen. Die teilweise sichtbaren Einbrüche der Konturlinien am linken und rechten Bildrand sind darstellungsbedingt und ohne Einfluß auf die umliegenden Werte.

In Abb. 3.1 ist eine zu Beginn des Jahres geringe Ca-Konzentration von maximal ca. 15 cm^{-3} zu erkennen. Dieser Wert nimmt in den folgenden Wochen sogar noch weiter ab, bevor im April wieder eine Zunahme der Ca-Dichte einsetzt. Im Sommer erreicht die Ca-Konzentration in rund 87,5 km Höhe mit Dichten von knapp 30 cm^{-3} ein Maximum. Ein weiteres Maximum der Ca-Konzentration tritt im Herbst bei rund 91 km auf (mehr als 40 cm^{-3}). Die Breite der Schicht wird im Sommer minimal. Zusammen mit der hohen Dichte sorgt dies besonders an der Schichtunterseite für einen sehr starken Dichte-Gradienten. Die Schichtunterkante wird im Sommer ca. 3 km höher beobachtet als im Winter. Gleichzeitig dehnt sich die Ca-Schicht zum Herbst hin auch weiter nach oben aus, so daß die Gesamtbreite der Schicht im Winter deutlich größer ist als im Sommer. Im Anhang B.3 ist der Jahresgang für die 66 Nächte ohne sporadische Schichten dargestellt.

Ca⁺-Ionen: Während des gesamten Jahres konnten Ca⁺-Ionen in einer breiten Schicht zwischen 90 und 100 km Höhe mit einer Dichte von mindestens 5 Ionen/cm³ beobachtet werden (Abb. 3.2). In den einzelnen Meßnächten wurden auch bei Fehlen einer ausgeprägten sporadischen Ca⁺-Schicht in diesem Höhenbereich fast immer Profile mit geringen Ionen-Konzentrationen aufgenommen. Dies steht im Gegensatz zu bisherigen Veröffentlichungen, in denen eine solche Ca⁺-Ionenschicht nur in Ausnahmefällen erwähnt und statt dessen in mehreren Fällen das Fehlen einer Ionenschicht dokumentiert wird [Granier et al., 1989; Alpers et al., 1996]. Im hier dokumentierten Zeitraum wurde bei 59 Sondierungsversuchen nur einmal keine Ca⁺-Ionenschicht gefunden. In Anlehnung an die permanente Ca-Schicht ist daher die Bezeichnung

einer *quasi-permanenten* Ca^+ -Schicht zwischen 90 und 100 km Höhe gerechtfertigt, die durch die folgende Definition beschrieben wird:

Der Begriff quasi-permanente Ca^+ -Schicht bezeichnet das regelmäßige Auftreten von Ca^+ -Ionen im Höhenbereich zwischen 90 und 100 km in einer Konzentration, die im Normalfall 5 Ionen/cm^3 nicht unterschreitet, im Verlauf der Nacht aber unter diese Schwelle und unter die Nachweisgrenze von $\geq 2 \text{ cm}^{-3}$ sinken kann. Die Halbwertsbreite einer nicht-sporadischen Ca^+ -Schicht liegt mit mindestens 5 km höher als die typische Halbwertsbreite sporadischer Ca^+ -Schichten. Sporadische und nicht-sporadische Ca^+ -Schichten werden in der Regel nicht gleichzeitig unterhalb von 100 km beobachtet, können aber auseinander hervorgehen. Das Vorhandensein einer quasi-permanenten Schicht rechtfertigt nicht die Trennung zwischen Nächten mit und ohne Ca^+_s , da letztere eine Ausnahme bilden.

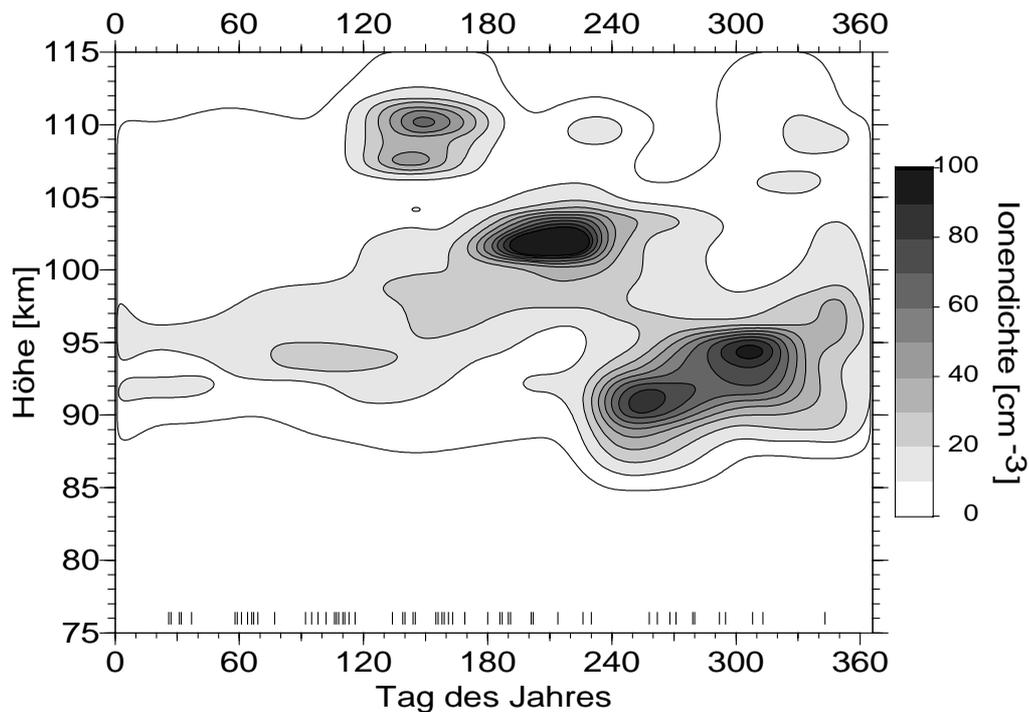


Abb. 3.2: Jahreszeitliche Variationen der Ca^+ -Schicht. Interpolation und Glättung erfolgten wie in Abb. 3.1. Die Linien über der Abszisse markieren die einzelnen Sondierungen. Die Einbrüche der 0- und 10-cm^{-3} -Kontur vor Tag 5 und nach Tag 360 sind teilweise darstellungsbedingt.

Die Höhendifferenz der Schichtunterkanten von Ca und Ca^+ ist in den Abbildungen 3.1 und 3.2 deutlich erkennbar, wobei die unterschiedlichen dargestellten Höhenbereiche zu beachten sind. Außerdem fallen in Abb. 3.2 Strukturen von relativ geringer zeitlicher und vertikaler Ausdehnung auf. Diese sind auf starke sporadische Schichten zurückzuführen, die z.T. auch über mehrere Tage in einer Höhe beobachtet wurden und so auch in den geglätteten Daten sichtbar werden. Im übrigen erkennt man einen starken Anstieg der Ca^+ -Konzentration im Herbst zwischen 90 und 95 km Höhe. Dieser fällt mit dem Konzentrationsanstieg des neutralen Calciums in dieser Jahreszeit zusammen (Abb. 3.1). Die größte Konzentration der Ca-Atome wird jedoch ca. 3 km tiefer erreicht als die der Ca^+ -Ionen.

3 Beobachtungen und Analysen der ungestörten Metallschicht

In den Tabellen 3.1 und 3.2 sind die wichtigsten Eigenschaften der Ca- und der Ca⁺-Schichten zusammengefaßt. Die Mittelwerte basieren auf Monatsmitteln, um eine Gewichtung mit der Meßhäufigkeit zu vermeiden. Zu beachten ist die um ca. 30% höhere Maximalkonzentration des Ca⁺-Ions und die mehr als doppelt so große Gesamtsäulendichte sowohl gegenüber dem eingeschränkten wie auch dem vollständigen Datensatz des neutralen Calciums. Die Daten werden mit den bisher veröffentlichten Ergebnissen anderer Gruppen verglichen.

Tab. 3.1: Schichtparameter der Ca-Schicht im Jahresmittel (in Klammern: höchste und niedrigste Werte auf Nachtmittelbasis)

	diese Arbeit (alle Nächte) ^{a)}	diese Arbeit (Nächte ohne Ca _s) ^{b)}	<i>Granier et al.</i> [1989]	<i>Qian und Gardner</i> [1995]	<i>Alpers et al.</i> [1996]
Dichte im Schicht- maximum [cm ⁻³]	22 (5-148)	22 (5-135)	22	ca. 100	31
Höhe des Schicht- maximums [km]	89,9 (84,7-114,5)	89,1 (84,7-95,9)	89,2	91,8 (<i>Schwer- punktshöhe</i>)	86,9
Schichtbreite (FWHM) [km]	9,4 (1,8-30,4)	7,7 (2,4-15,0)	11	3,5 (<i>rms-Breite</i>)	4,2
Säulendichte [cm ⁻²]	2,4·10 ⁷ (0,6-9,2·10 ⁷)	2,1·10 ⁷ (0,6-6,2·10 ⁷)	2,7·10 ⁷	6,3·10 ⁷	2,2·10 ⁷
Säulendichte bis 90 km [cm ⁻²]	1,0·10 ⁷ (0,2-5,1·10 ⁷)	1,0·10 ⁷ (0,3-5,1·10 ⁷)	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben

^{a)} 112 Nächte; ^{b)} 66 Nächte

Tab. 3.2: Schichtparameter der Ca⁺-Schicht im Jahresmittel (in Klammern: höchste und niedrigste Werte auf Nachtmittelbasis)

	diese Arbeit ^{a)}	<i>Granier et al.</i> [1989] ^{c)}	<i>Gardner et al.</i> [1993] ^{e)}	<i>Alpers et al.</i> [1996]
Dichte im Schicht- maximum [cm ⁻³]	29 (5-726)	< 2400	440; 570	127
Höhe des Schicht- maximums [km]	91,9 (90,3-110,9)	90 – 119	95,6; 99,2; 96,3	97,6
Schichtbreite (FWHM) [km]	5,4 ^{b)} (1,6-18,4)	> 1,2	2,2; 0,9	8,0
Säulendichte [cm ⁻²]	4,9·10 ⁷ (0,7-21,4·10 ⁷)	2·10 ⁷ - 6·10 ⁸ ^{d)}	6,0·10 ⁷ ; 4,4·10 ⁷	14,8·10 ⁷

^{a)} 58 Nächte

^{b)} in 10 Nächten konnte die Schichtbreite wegen mehrerer Maxima nicht korrekt bestimmt werden

^{c)} Extremwerte aus 24 Sondierungen

^{d)} starke Schwankungen in 6 Nächten 1983, geringe Schwankungen um Mittelwert 6·10⁷ cm⁻² in 18 Nächten 1984

^{e)} 3 Profile (je ca. 20 min) in zwei Dezembernächten

3.1.2 Harmonische Analyse wichtiger Parameter der Ca-Schicht

Die allgemeinen Veränderungen der Ca-Schicht sind bereits in der Konturdarstellung der Schicht im Jahresverlauf (Abb. 3.1) sichtbar geworden. Im Hinblick auf die spätere Modellierung der Ca-Schicht sollen die Veränderungen verschiedener Schichtparameter wie Säulendichte oder Schwerpunktshöhe nach jährlichen und halbjährlichen Perioden untersucht werden. Längerperiodische Veränderungen (z.B. mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus [Whitehead, 1989; Joiner und Aikin, 1996]) können einem 2-jährigen Datensatz nicht entnommen werden. Kürzerperiodische Veränderungen werden aufgrund der notwendigen Mittelungen nicht wiedergegeben und beschreiben auch keinen Gleichgewichtszustand der Ca-Schicht. Auch bei Auftreten sporadischer Schichten kann man kein chemisches Gleichgewicht der Ca-Schicht mehr annehmen. Darum werden hier nur die 66 Nächte ohne starke sporadische Schichten analysiert. Aufgrund der Dominanz sporadischer Schichten bei Ca^+ -Ionen variieren die Schichtparameter wie Ca^+ -Säulendichte oder -Schwerpunktshöhe von Nacht zu Nacht zu stark, um charakteristische Eigenschaften zu zeigen, und werden hier ebenfalls nicht betrachtet.

Für die harmonische Analyse wurden beide Meßjahre zusammengefaßt. An die so erhaltene Verteilung wurde die folgende Funktion nach dem Prinzip des *Least-Square-Fit* angepaßt, die gleichzeitig Veränderungen mit jährlicher und halbjährlicher Periode berücksichtigt:

$$f(x) = M + A_1 \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{365} \cdot d - a_1\right] + A_2 \cdot \cos\left[\frac{4\pi}{365} \cdot d - a_2\right] \quad (3.1)$$

M : Mittelwert der Funktion

A_1, A_2 : Amplituden des jährlichen und halbjährlichen Anteils

a_1, a_2 : Phasenverschiebung des jährlichen und halbjährlichen Anteils

d : Tag des Jahres

Alle untersuchten Schichtparameter zeigen eine halbjährliche Variation mit unterschiedlichen Anteilen von ganzjähriger Periode (siehe Abb. 3.3). Als Maß für den Anteil der beiden Periodendauern sind die Amplituden A_1 und A_2 der zugehörigen Cosinusfunktionen in der Abbildung eingetragen. Die Gesamtsäulendichte zeigt einen überwiegenden Einfluß jährlicher Variationen. Zum Vergleich zeigt darum Abb. 3.3 a) gestrichelt einen *Least-Square-Fit* mit nur jährlicher Periode ($A_2=0$ in Gleichung 3.1). Diese Funktion bildet jedoch besonders die Frühjahrswerte nicht zutreffend ab. Die Schwerpunktshöhe zeigt dagegen einen überwiegenden Anteil halbjährlicher Variationen. Eine Aussage über die *Qualität* des *Least-Square-Fit* macht die Standardabweichung der Amplituden und des Mittelwertes. Danach wird die Halbwertsbreite von allen Schichtparametern am besten durch die errechnete Funktion abgebildet, die Standardabweichungen der Amplituden liegen bei rund 20%. Den gleichen Wert erreicht die Amplitude der halbjährlichen Variation der Schwerpunktshöhe, was ihre Dominanz über die jährliche Variation bestätigt. Die übrigen Amplitudenwerte besitzen Standardabweichungen von 30-40%. Die Mittelwerte werden durch die errechneten Funktionen durchgehend besser wiedergegeben. Die Standardabweichungen betragen hier höchstens 10% (Maximaldichte), sonst ca. 5% oder weniger.

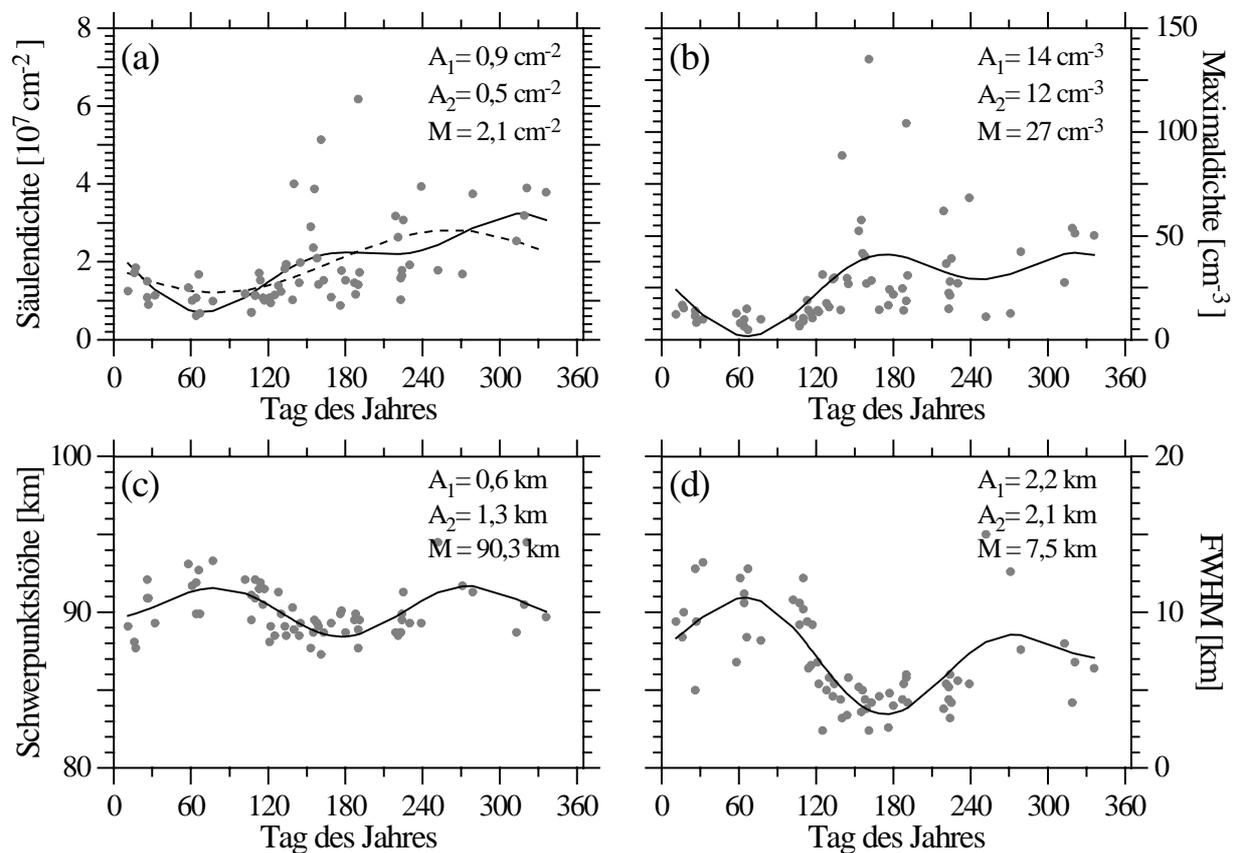


Abb. 3.3: Nachtmittelwerte und harmonischer Least-Square-Fit der Schichtparameter a) Säulendichte, b) Dichte im Maximum, c) Höhe des Schwerpunkts, d) volle Halbwertsbreite. Zur Bedeutung der Zahlenwerte siehe Text.

Da bei der harmonischen Analyse alle Meßnächte gleich gewichtet werden, ergeben sich andere Mittelwerte (M) der Schichtparameter als bei der Berechnung aus Monatsmitteln (Tab. 3.1). So unterschätzt die harmonische Analyse den Wert für die Säulendichte und überschätzt die Dichte im Schichtmaximum. Die Halbwertsbreite zeigt dagegen gute Übereinstimmung.

Faßt man die Eigenschaften der Ca-Schicht aus Abb. 3.1 und 3.3 zusammen, so ergibt sich:

- Im Frühjahr ist die Ca-Schicht breit und in relativ großer Höhe. Trotzdem ist die Säulendichte gering, da auch die Dichte im Schichtmaximum gering ist.
- Zum Sommer sinkt die Schicht 2-3 km tiefer, gleichzeitig wird sie deutlich schmaler. Zusammen mit der stark erhöhten Maximalkonzentration ergibt sich auch eine erhöhte Säulendichte.
- Im Herbst ändert sich die Maximalkonzentration nur wenig, gleichzeitig steigen jedoch die Schichthöhe und die Halbwertsbreite der Ca-Schicht wieder an. Daraus ergibt sich eine leichte weitere Steigerung der Säulendichte.
- Zum Ende des Jahres ergeben sich dramatische Veränderungen der Ca-Schicht. Die Säulendichte nimmt um rund ein Drittel ab, die Dichte im Schichtmaximum sogar um

rund die Hälfte. Die Halbwertsbreite nimmt entsprechend zu. Gleichzeitig ändert sich die Höhe der Schicht nur wenig.

In Abb. 3.3 erkennt man bei Betrachtung der einzelnen Nachtmittelwerte (Punkte), daß auch die Schwankungen der Schichtparameter Variationen unterliegen. So zeigen beide Dichteparameter von Mai bis August größere Unterschiede von Nacht zu Nacht als von September bis April. Die Breite der Schicht ist dagegen von Mai bis August relativ konstant, ändert sich aber z.B. im ersten Drittel des Jahres bei relativ konstanter Schwerpunktshöhe ständig. Im ersten Drittel des Jahres ändert sich also vor allem die *Form* und *Lage* der Schicht, während es im mittleren Drittel überwiegend die *Dichte* ist. Für das letzte Jahresdrittel deuten die Sondierungen Änderungen beider Parameter an.

Die harmonische Analyse und besonders die Bewertung der Veränderungen zum Jahreswechsel leiden an der geringen Zahl *verwertbarer* Messungen zwischen September und Dezember. Hierfür ist zum einen das unbeständige, wolkenreiche Herbstwetter verantwortlich, zum anderen aber auch die in dieser Zeit besonders häufigen sporadischen Calcium-Schichten (vgl. Kapitel 5), die die Veränderungen der permanenten Schicht überlagerten und deswegen aussortiert wurden. Im Januar war die Häufigkeit sporadischer Schichten dann wieder geringer.

3.2 Das mittlere Profil der Ca- und Ca⁺-Schichten

3.2.1 Jahres- und Quartalsmittel der Ca- und Ca⁺-Schichten

Ca-Atome: Aus den Nachtmitteln der Ca-Sondierungen ließen sich Monatsmittel für die 12 Monate des Jahres und daraus ein Jahresmittel berechnen (Abb. 3.4 a). Um das Ca-Profil besser mit den Profilen anderer Metalle und modellierten Profilen (Kap. 4) vergleichen zu können, wurden wiederum nur die 66 Nächte ohne sporadische Schichten betrachtet. Im Anhang B.4 werden diese Profile dem Mittel aus allen Sondierungen gegenübergestellt.

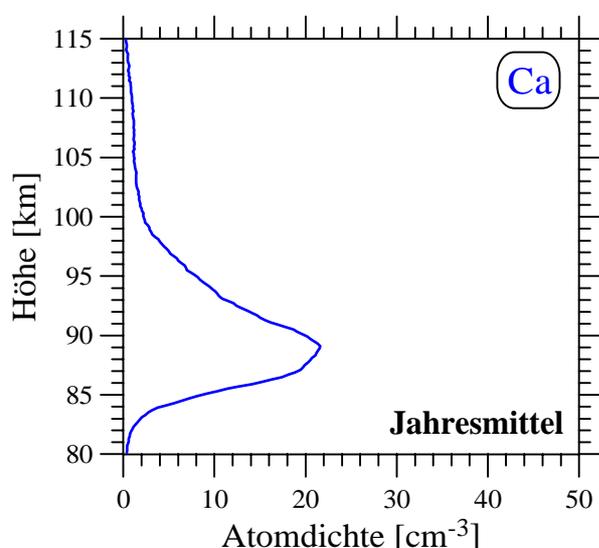


Abb. 3.4 a): Jahresmittel der Ca-Schicht 1997/98 über Kühlungsborn (auf Basis von Monatsmitteln)

Die vorhergehenden Abschnitte haben bereits gezeigt, daß die Ca-Schicht im Jahresverlauf starken Variationen unterliegt. Abb. 3.4 b) vergleicht darum die Mittel aus den vier Quartalen des Jahres, die ebenfalls aus Monatsmitteln berechnet wurden. Die Einteilung in Quartale ergibt sich aus der Betrachtung von Säulendichte und Maximumdichte, die ungefähr in diesem Mittelungsrhythmus die größten Zuwächse zeigen. Bei Median- und Maximumhöhe sowie der Halbwertsbreite ändert sich ungefähr zum Ende jedes Quartals das Vorzeichen der Ableitung nach der Zeit.

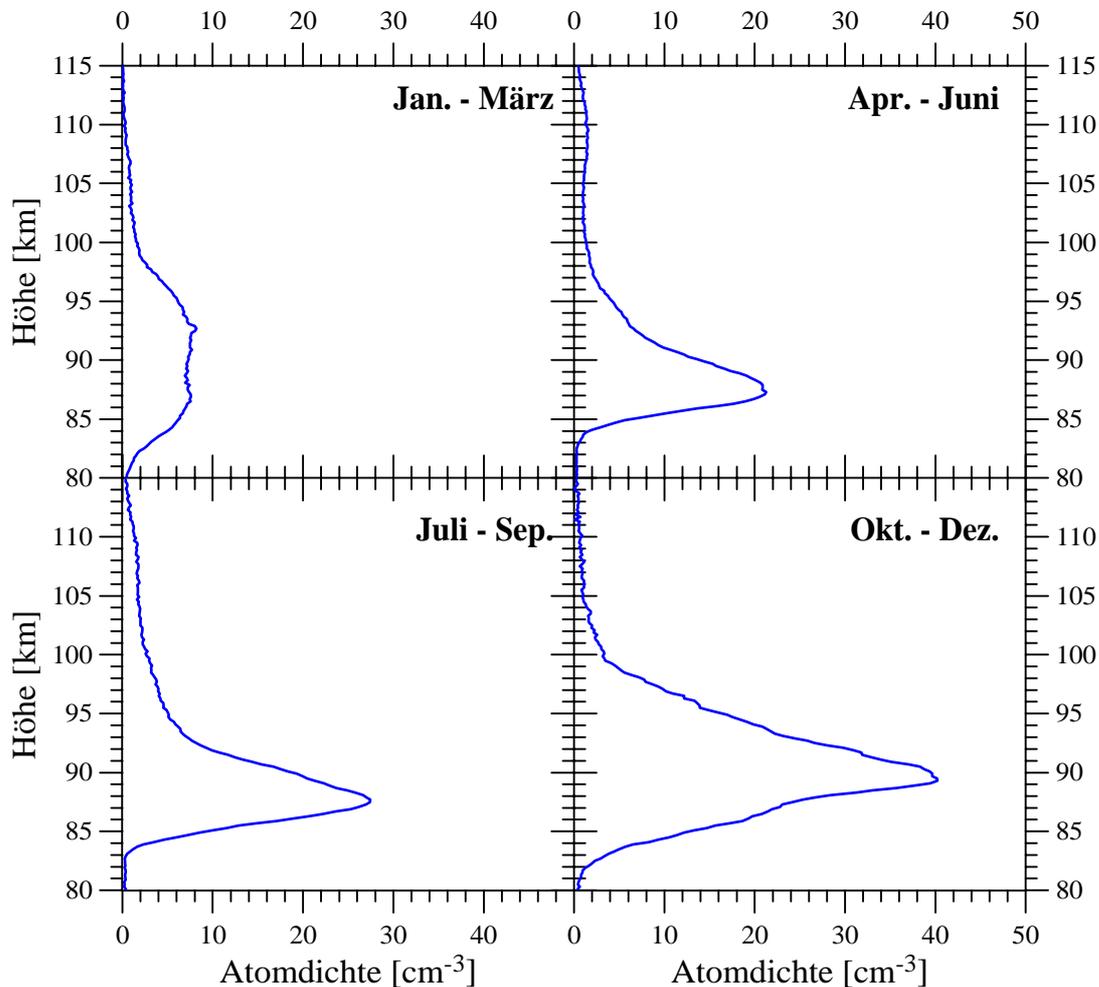


Abb. 3.4 b): Quartalsmittel der Ca-Schicht 1997/98 über Kühlungsborn

Die Unterkante der Ca-Schicht liegt im Jahresmittel bei ca. 82 km (Abb. 3.4 a). Mit einem mittleren Gradienten von $2,7 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ nimmt die Ca-Konzentration darüber bis zum Schichtmaximum in 89 km Höhe zu (maximale Dichte ca. 21 Atome/cm^3). Oberhalb des Schichtmaximums ist der Betrag des Gradienten mit $1,7 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ geringer und nimmt mit der Höhe noch weiter ab, so daß sich eine Ca-Schicht bis über 110 km ausbildet². Bei Betrachtung kürzerer Zeiträume (bis hin zu einzelnen Profilen) ist der Gradient an der Unterseite der Schicht deutlich steiler als das hier angegebene Jahresmittel. Im Frühjahr und Winter wurde z.B. meist ein Wert von ca. $10 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$, im Sommer und Herbst sogar $20 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ oder mehr beobachtet. Durch Schwankungen der Höhe der Unterkante um mehrere Kilometer im Verlauf der Nacht und zusätzliche jahreszeitliche Variationen der Unterkantenhöhe ergibt sich in den Quartals- und Jahresmitteln jedoch ein sehr viel schwächerer Gradient.

Ca⁺-Ionen: Die mittleren Profile der Ca⁺-Ionenschicht wurden ebenfalls aus Monats- und Nachtmitteln berechnet. Im Unterschied zu neutralem Calcium werden Ca⁺-Ionen im Jahresmittel erst oberhalb von ca. 85 km beobachtet (Abb. 3.5 a). Aus den Quartalsprofilen

² Das Ca-Vorkommen oberhalb von 100 km wird vor allem durch einzelne Nächte im Sommer verursacht, in denen sich nicht-sporadische Schichten bis in mehr als 110 km Höhe ausdehnten.

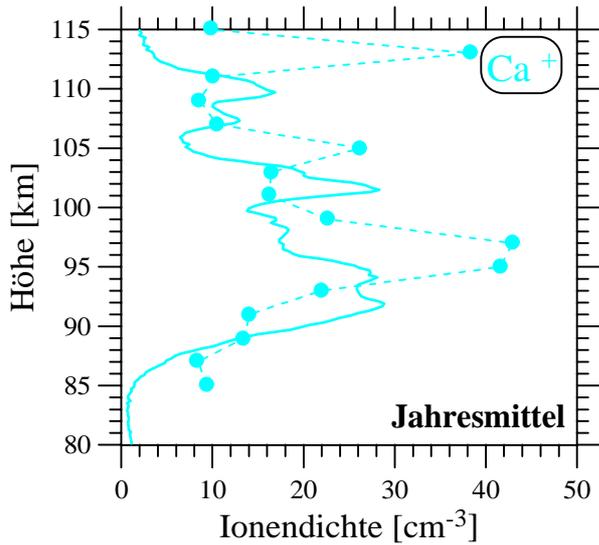


Abb. 3.5 a): Jahresmittel der Ca^+ -Schicht 1997/98 über Kühlungsborn. Gestrichelt: Mittel aus 12 Raketensondierungen des Ions 40^+ [J. M. Grebowsky, persönliche Mitteilung]

(Abb. 3.5 b) erkennt man, daß diese Unterkante in der ersten Jahreshälfte sogar noch ein paar Kilometer höher liegt. Die Ca^+ -Schicht zeigt im Jahresdurchschnitt viele lokale Dichtemaxima, die vor allem durch die Anreicherung von Ca^+ in häufig über mehrere Nächte in einer Höhe beobachteten sporadischen Schichten entstehen. Im Abschnitt 5.1 wird das Absinken sporadischer Schichten aufgrund elektrischer Feldkräfte beschrieben. Im allgemeinen nimmt die Absinkgeschwindigkeit mit abnehmender Höhe aufgrund der zunehmenden Luftdichte und der entsprechend zunehmenden Stoßfrequenz mit anderen Luftmolekülen ab. Da gleichzeitig die Rekombination von Ionen zu Neutralteilchen aufgrund von Stößen zu-

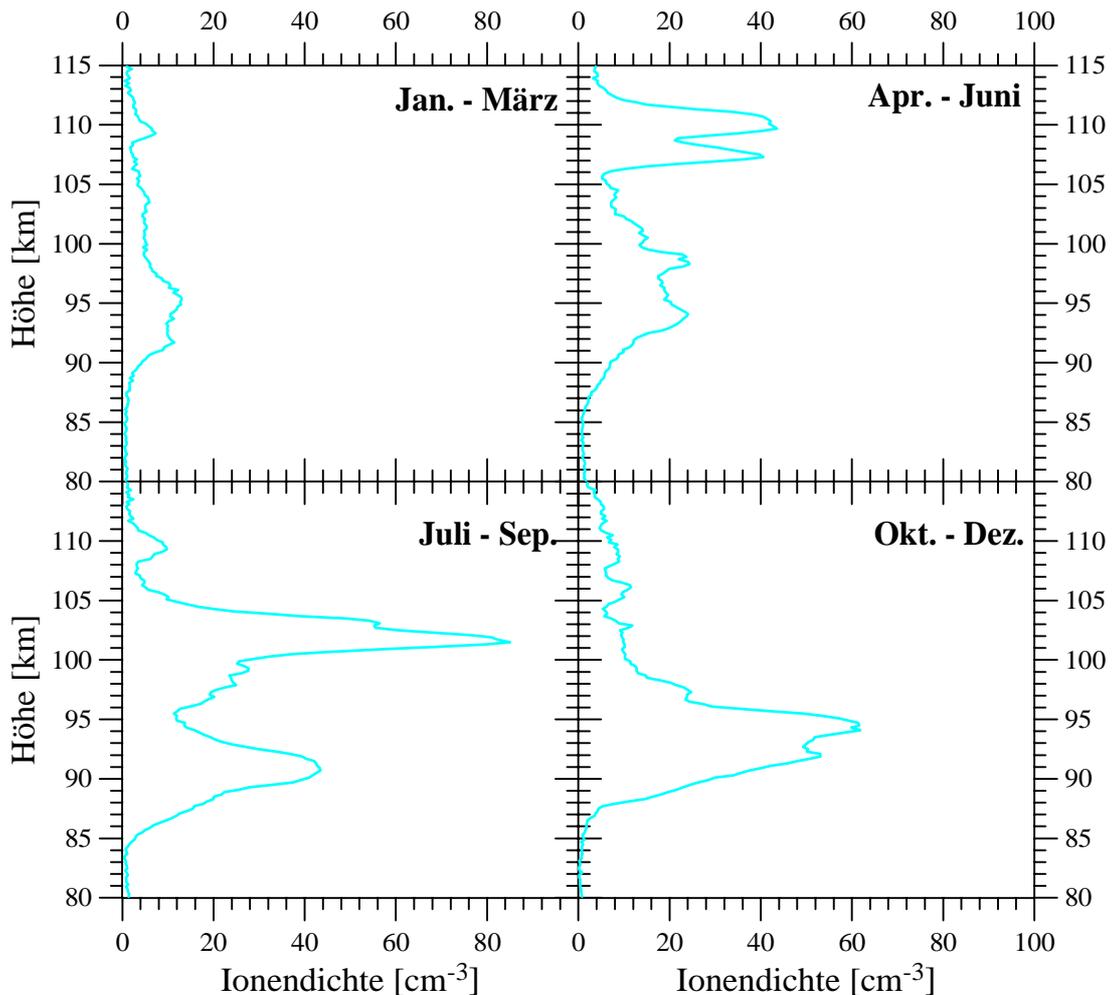


Abb. 3.5 b): Quartalsmittel der Ca^+ -Schicht 1997/98 über Kühlungsborn

nimmt, beobachtet man das Maximum des Ca^+ -Profils im Nachtmittel bei ca. 92 km Höhe. Oberhalb von ca. 100 km ist die Ca^+ -Konzentration im Jahresmittel ca. 5- bis 15-mal größer als die des neutralen Calciums (vgl. Abb. 3.4). Wie Anhang B.4 zeigt, ist dies nicht auf die Auswahl der Meßnächte beim neutralen Ca zurückzuführen, sondern gilt auch bei Betrachtung aller Nächte. Im Abschnitt 5.1 wird gezeigt, daß oberhalb von 100 km Höhe auch innerhalb der sporadischen Schichten die Ca^+ -Konzentration sehr viel größer ist als die des neutralen Calciums.

Im Vergleich der Lidardaten mit Ergebnissen, die mit Ionen-Massenspektrometern auf Höhenforschungsraketen gewonnen wurden, fällt das recht ähnliche Profil aus drei Hauptmaxima auf, von denen das untere die höchste Dichte und die größte Halbwertsbreite besitzt. Die Ca^+ -Maxima liegen jedoch bei den Raketensondierungen jeweils ca. 3 km höher. Unterhalb von 100 km ergeben die Lidardaten Konzentrationen von nur gut 50% der mit Massenspektrometern gemessenen Werte. Für diese Differenz und die unterschiedliche Höhe der Maxima gibt es verschiedene Erklärungen:

- Die Ca^+ -Schicht zeigt im Jahresverlauf eine sehr große Variation (siehe Abb. 3.5 b). Diese wird u.U. in 12 Raketenmessungen weniger typisch beobachtet, als in 58 Lidar-Sondierungen.
- Raketenmessungen stellen Punktmessungen dar. Diese sind i.a. weniger repräsentativ als mehrstündige Lidarmessungen. Zudem werden Raketen meistens zu besonderen Gelegenheiten wie dem Auftreten von starken *sporadischen Elektronenschichten* (E_S), *Leuchtenden Nachtwolken* o.ä. gestartet, die für sich schon besondere atmosphärische Bedingungen darstellen.
- Die in *Grebowsky et al.* [1998] für mehrere Metall-Ionen zusammengestellten Massenspektrometer-Sondierungen verteilen sich auf verschiedene geographische Breiten von 32°S bis 69°N [*J. M. Grebowsky*, persönliche Mitteilung].

Ionen-Massenspektrometer ermöglichen nur eine Separierung nach Ionenmassen. Die vorgestellten Ergebnisse entsprechen den Beobachtungen von Ionen von 40 atomaren Masseneinheiten (amu). Dazu gehören Ca^+ , MgO^+ und NaOH^+ , wobei Ca^+ den weitaus größten Anteil an der Konzentration von 40^+ haben soll [*Istomin*, 1963; *Plane*, 1991].

3.2.2 Veränderungen in der Form der Ca-Schicht

Im Abschnitt 3.1.2 wurde anhand von Parametern wie Säulendichte oder Halbwertsbreite der Ca-Schicht beschrieben, daß im ersten Jahresdrittel die Lage der Schicht und im zweiten Drittel vor allem die Konzentration der Ca-Schicht Veränderungen von Nacht zu Nacht unterliegen. Dies soll hier durch die Betrachtung von Schichtprofilen weiter untersucht werden. Dazu werden die verschiedenen Nachtmittelprofile und ihre Abweichungen vom Monatsmittelprofil berechnet. Für jeden Monat ergibt sich so die Standardabweichung der Dichte in Abhängigkeit von der Höhe.

In Abb. 3.6 werden diese Daten am Beispiel von Januar und August gegenübergestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist das Monatsmittel im Maximum auf 1 normiert worden. Die

einzelnen Monatsmittel (Kreise) und die Standardabweichung wurden mit dem gleichen Normierungsfaktor versehen. Die Höhenauflösung beträgt 1 km. Man erkennt, daß die Abweichungen (durchgezogene Linie) im Januar vor allem an der Unterseite der Schicht auftreten. Über mehrere Höhenkanäle beträgt die Abweichung rund 0,5 der Dichte im Maximum. Demgegenüber zeigt die August-Schicht die größten Variationen im Maximum der Konzentration. Aus den sehr ähnlichen Formen von August-Monatsmittel und Standardabweichungsprofil mit Halbwertsbreiten von jeweils ca. 5,5 km ergibt sich, daß die Variation der Dichte gleichmäßig über die gesamte Schicht erfolgt. Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.2 werden hier also bestätigt. Das gezeigte Januar-Verhalten ist repräsentativ für den gesamten Winter, während das August-Profil die typische Sommersituation wiedergibt.

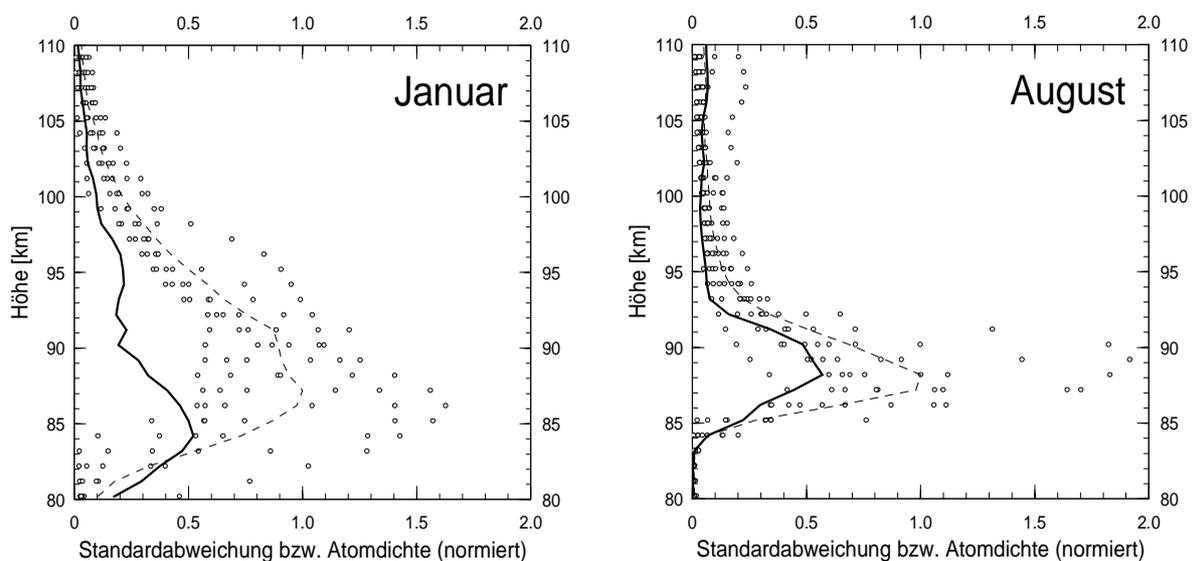


Abb. 3.6: Standardabweichung der Nachtmittel vom normierten Monatsmittel für die Monate Januar und August. Nachtmittel (Kreise), Monatsmittel (dünn gestrichelt), Standardabweichung (dick ausgezogen). Die Abszissen gelten gleichermaßen für Mittelwerte und Standardabweichung.

Die Monatsmittel geben aufgrund der langen Mittelung die Schicht so wieder, wie sie im chemischen Gleichgewicht aussehen würde. Kurzfristige Schwankungen werden hier eliminiert. Die Betrachtung der Abweichungen der Nachtmittel vom Monatsmittel legt jedoch nahe, daß die Ca-Schicht im Januar stärker von dynamischen Veränderungen geprägt ist. In der Tat erwartet man im Winter die größte Aktivität von internen Schwerewellen, die sich in dieser Jahreszeit aufgrund der vorherrschenden Winde in tieferen Atmosphärenschichten bis in die obere Mesosphäre ausbreiten können [Garcia und Solomon, 1985]. Die Wellen verursachen eine vertikale Verschiebung der neutralen Gesamtatmosphäre im Verlauf mehrerer Stunden, also auch der Unterkante der Ca-Schicht. Auftretende adiabatische Temperaturänderungen sind für die Unterkante der Metallschicht vernachlässigbar. Im August dagegen verändert sich die Metallschicht als ganzes, was man durch höhenunabhängige Veränderungen des chemischen Gleichgewichts zwischen atomarem Calcium, Calcium-Verbindungen und $-$ Ionen erklären kann (vgl. Kapitel 4). Aufgrund der Filterwirkung der stratosphärischen Windfelder erreicht im Sommer nur ein kleiner Teil des Schwerewellenspektrums die obere Mesosphäre, wobei die

Wellenaktivität im Spätsommer allgemein abnimmt [Garcia und Solomon, 1985]. Die *dynamischen* Änderungen der atmosphärischen Konstituenten sind damit im August insgesamt geringer. Die tiefe Sommer-Mesopause um 86 km [She und von Zahn, 1998] kann jedoch ein Grund für stärkere Schwankungen des chemischen Gleichgewichts sein.

3.3 Nächtliche Variationen der Ca-Schicht

In den vorhergehenden Abschnitten ist ein allgemeines Bild der Ca-Schicht in der mittleren Atmosphäre auf der Basis von Nachtmitteln gezeichnet worden. Die Variationen innerhalb einer Nacht wurden dabei außer acht gelassen. Ein wichtiger Parameter solcher nächtlicher Veränderungen ist die Säulendichte, die Einflüsse auf die gesamte Schicht wiedergibt, aber z.B. von Änderungen der Schichtform unbeeinflusst bleibt. Änderungen der Schichtform im Verlauf der Nacht werden anschließend im Abschnitt 3.3.2 untersucht. Alle Untersuchungen dieses Abschnitts beziehen sich nur auf Nächte ohne starke sporadische Schichten.

3.3.1 Veränderungen der Säulendichte

Im Mittel beträgt die Säulendichte der Calcium-Schicht $2,1 \cdot 10^7$ Atome/cm². In diesem Abschnitt werden die Variationen der Säulendichte innerhalb einer Nacht näher untersucht. Um dabei die Winterdaten (geringe Dichte) besser mit den Sommerdaten (hohe Dichte) vergleichen zu können, werden nur relative Änderungen zur mittleren Säulendichte der Nacht betrachtet.

Bereits an verschiedenen Stellen dieses Kapitels wurde die große Variabilität der Ca-Schicht beschrieben (vgl. Anhang B.1). Diese Variationen setzen sich in den nächtlichen Schwankungen der Säulendichte fort. So konnten in den verschiedenen Nächten eines Beobachtungsmonats häufig sowohl mit der Zeit ansteigende Säulendichten ermittelt werden, als auch konstante, absinkende oder gänzlich unregelmäßige Werte. Um trotzdem zu einer allgemeingültigen Aussage über die Änderungen der Säulendichte zu kommen, werden hier wiederum über einen Zeitraum von einem Monat gemittelte Werte vorgestellt.

In Abb. 3.7 sind die Säulendichte-Änderungen für einen Wintermonat (Januar) und einen Sommermonat (August) gegenübergestellt. Die Daten sind über eine halbe Stunde mit 5 min. Schrittweite geglättet. Im Januar beginnt eine typische Meßnacht mit zunächst gegenüber dem Mittel leicht erhöhten Dichten, die aber eine sinkende Tendenz zeigen. Ca. ab 21 UT beginnt die Säulendichte dann wieder zu steigen und erreicht gegen Mitternacht UT in etwa den Nachtmittelwert. Der Anstieg der Dichte setzt sich noch für ca. 3 Stunden fort, bevor dann wieder eine Dichteabnahme einsetzt. Im großen und ganzen scheint die Säulendichte also einem sinusförmigen Verlauf zu folgen, mit Nullstellen gegen 20 UT, 0 UT und 6 UT. Die Amplitude der Dichteänderungen entspricht ungefähr der mittleren Säulendichte im Januar selbst ($1,5 \cdot 10^7$ cm⁻²). Dieser Verlauf wird von kurzzeitigen Schwankungen überlagert. Um den scheinbar sinusförmigen Verlauf der Januar-Säulendichten zu prüfen, wurde eine Sinusfunktion numerisch an die Daten angepaßt. Wie die Abb. 3.7 zeigt, liegt die Periode der Veränderungen zwischen 8 und 12 Stunden. Dies soll im Abschnitt 3.4 weiter diskutiert werden.

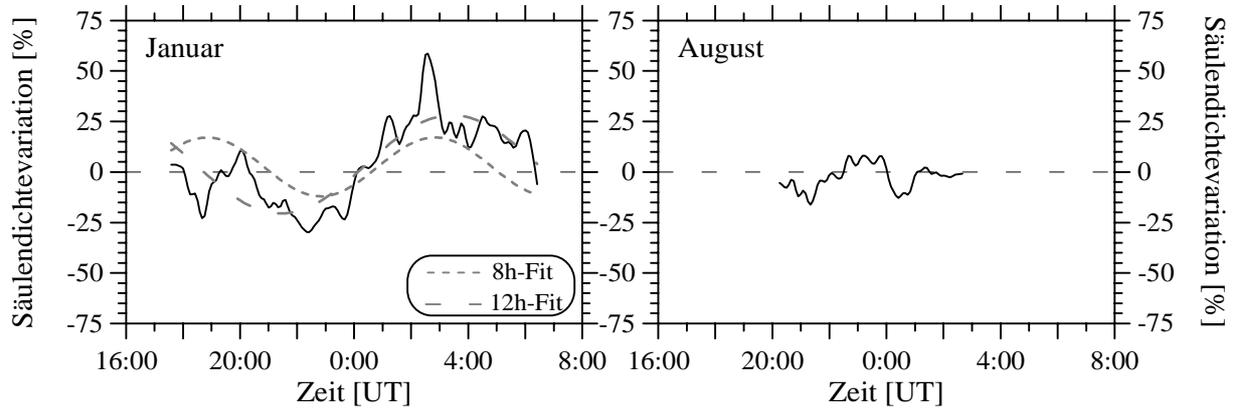


Abb. 3.7: Nächtliche Variationen der Säulendichte am Beispiel der Sondierungen der Monate Januar (6 Nächte, links) und August (7 Nächte, rechts). Dargestellt ist die über verschiedene Nächte gemittelte relative Abweichung der Säulendichte vom Nachtmittel in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit. Das Januar-Bild zeigt außerdem an die Meßdaten angepaßte Sinusfunktionen mit 12 h (lang gestrichelt) bzw. 8 h (kurz gestrichelt) Periode

Demgegenüber wird der nächtliche Verlauf der Säulendichte im August von kurzzeitigen Schwankungen um den Nachtmittelwert dominiert. Eine Periodizität ist ebensowenig erkennbar wie eine im Mittel ansteigende oder absinkende Säulendichte. Weitergehende Vergleiche sind aufgrund der Kürze der Sommernächte nicht möglich.

Periodische Säulendichteänderungen sind in den Kühlungsborner Ca-Daten im Januar am besten sichtbar. Auch im März kann man noch eine periodische Struktur erkennen. Die übrigen Monate zeigen zwar noch häufig einen Anstieg der Säulendichte, diese sind jedoch von unregelmäßigen Schwankungen überlagert.

3.3.2 Veränderungen der gesamten Ca-Schicht

Aus der Beobachtung eines sinusförmigen Verlaufs der Säulendichteveriationen im Januar und einer fehlenden Periodizität im August folgt die Frage, ob es höhenabhängige Unterschiede in den Konzentrationsänderungen von Calcium gibt. Dazu wurde zunächst die Abweichung $dN(z,t)$ der zu einem Zeitpunkt gemessenen Teilchenzahldichte $N(z,t)$ vom Nachtmittelwert $N_M(z)$ berechnet. Um Sondierungen mit unterschiedlichen Ca-Konzentrationen und die verschiedenen Höhenbereiche der Ca-Schicht besser vergleichen zu können, wurden die so erhaltenen Abweichungen auf die mittlere Konzentration $N_M(z)$ normiert:

$$\Delta N = \frac{dN(z,t)}{N_M(z)} = \frac{N(z,t) - N_M(z)}{N_M(z)} \quad (3.2)$$

In Abb. 3.8 sind die Ergebnisse dieser Berechnung als Monatsmittelwerte am Beispiel des Januar und August dargestellt. Für jeden Höhenbereich sind die Konzentrationsänderungen im Nachtverlauf erkennbar, der Nulldurchgang ist in der Farbdarstellung besonders hervorgehoben. Man erkennt im linken Teilbild (Januar) die gleichen periodischen Änderungen wie in Abb. 3.7. Zu Beginn ist nur die Dichte um 85 km herum überdurchschnittlich, ansonsten liegt die Konzentration über den gesamten Höhenbereich der Ca-Schicht bis ca. 23 UT unter dem Nachtmittelwert. Zwischen 23 UT und 0 UT erreicht die Konzentration in allen Höhen den

Nachtmittelwert und erhöht sich weiter bis über den Durchschnitt. Die Periodendauer der Dichtevariation beträgt im gesamten Höhenbereich ca. 12 h.

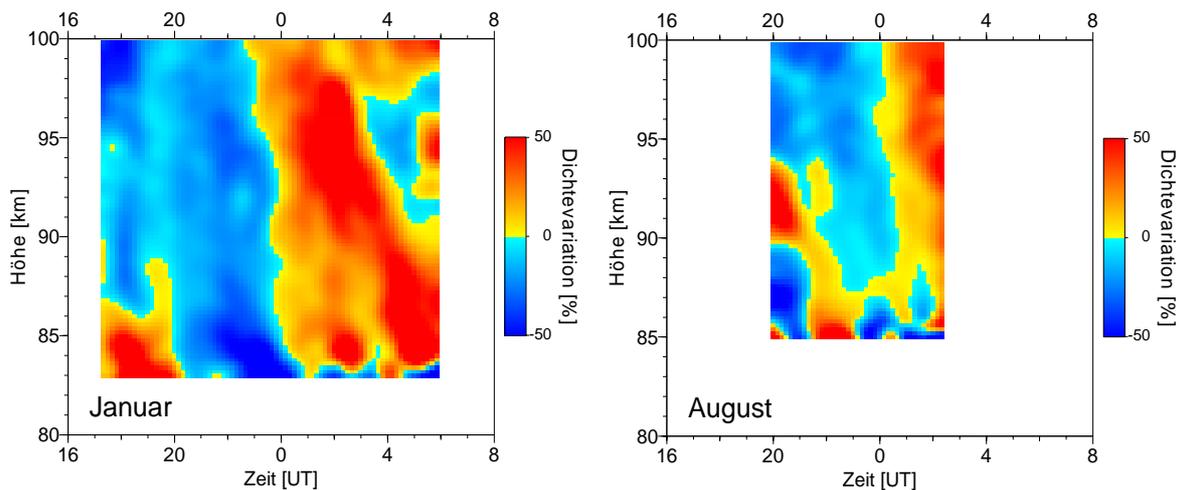


Abb. 3.8: Nächtliche Variationen der Calcium-Konzentration in Abhängigkeit von Höhe und Zeit. Die Werte sind auf ein Zeitraster mit 5 Minuten Schrittweite projiziert und über 7 Schritte geglättet.

Der August zeigt demgegenüber ein verändertes Bild. Abgesehen von kurzzeitigen Schwankungen liegt die Periode der Dichteänderungen über den gesamten Schichtbereich von 85 bis 95 km bei ca. 6 h. Die geringe Ca-Konzentration oberhalb von 95 km macht die Betrachtung der Änderungen und ihrer Periode in dieser Höhe unsicher. Beim Vergleich beider Monate fällt auf, daß trotz der sehr unterschiedlichen Maximaldichten im Januar und August die normierten Abweichungen in beiden Monaten Werte von ca. -50% bis $+50\%$ annehmen.

3.4 Vergleich mit anderen Messungen und Diskussion der Beobachtungen

Obwohl die erste Ca-Sondierung bereits 1982 gelang [Granier *et al.*, 1985a], wurden bisher erst wenige Ergebnisse zu mesosphärischen Ca- und Ca^+ -Schichten veröffentlicht. Diese sollen hier mit den Beobachtungen dieser Arbeit verglichen werden. Daneben werden Erklärungsansätze für die in dieser Arbeit beobachteten saisonalen Unterschiede von Ca-Schichtform und Säulendichtevariationen erläutert.

3.4.1 Die mittleren Ca- und Ca^+ -Schichten und ihre saisonalen Veränderungen

Ca-Atome: Granier *et al.* [1989] veröffentlichten den ersten größeren Datensatz von Ca-Sondierungen. Die Beobachtungen in Haute-Provence (Frankreich, 44°N , 6°O) umfassen 32 Nächte, davon wurde eine Messung im April, die übrigen in der jeweils zweiten Jahreshälfte zwischen 1982 und 1987 vorgenommen. Ein Jahresgang kann auf diese Weise nicht erhalten werden. Die Sondierungen zeigen jedoch ähnlich starke Schwankungen der Säulendichtewerte wie in Abb. 3.3. Das Schichtmaximum wurde im Mittel der Daten im Sommer 3 bis 4 km tiefer beobachtet als in den übrigen Sondierungen. Dies bestätigt sehr gut die hier vorgestellten Ergebnisse. Unterschiede bestehen allerdings in der Ca-Dichte, für die sich nach

Granier et al. [1989] Minima im Sommer (Säulendichte $2,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$, Konzentration 21 cm^{-3}) und Maxima im Herbst ergeben (Säulendichte $3,0 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$, Konzentration 28 cm^{-3}). Die Werte liegen jedoch im Bereich der Variation der Kühlungsborner Daten (vgl. Tabelle 3.1).

Auch in Urbana-Champaign (Illinois, 40°N , 88°W) wurden in insgesamt 8 Nächten zwischen Oktober 1992 und Januar 1993 Ca-Sondierungen vorgenommen [*Qian und Gardner*, 1995]. Die mittlere Säulendichte lag dort mit $6,7 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ höher als der durchschnittliche Winterwert für Kühlungsborn (Oktober bis Januar alle Nächte: $3,4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$, ohne sporadische Schichten: $2,1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$). Andererseits wurden auch über Kühlungsborn in einzelnen Nächten mit starken sporadischen Schichten ähnliche Werte beobachtet. Im Datensatz von *Qian und Gardner* [1995] beobachtet man ebenfalls eine deutliche Dichteabnahme zwischen Dezember und Januar.

Am früheren Standort in Juliusruh/Rügen (55°N , 13°O) wurden mit dem IAP-Doppellidar bereits im Sommer 1995 Ca- und Ca^+ -Sondierungen vorgenommen und von *Alpers et al.* [1996] veröffentlicht. Die sich aus sechs Ca-Beobachtungen ergebenden Mittelwerte sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Sie entsprechen sehr gut den im Rahmen der vorliegenden Arbeit beobachteten Sommerwerten (vgl. Abb. 3.3).

Die saisonalen Variationen von Ca lassen sich nur begrenzt mit den lückenhaften Datensätzen bisheriger Veröffentlichungen, wohl aber mit Erkenntnissen zu anderen Metallen vergleichen. Verschiedene Veröffentlichungen zu Fe, K und Na zeigen unterschiedliche Anteile jährlicher und halbjährlicher Variationen z.B. in der Säulendichte [*Kane und Gardner*, 1993b; *Eska et al.*, 1998; *States und Gardner*, 1999]. Alle Jahresgänge sind jedoch ungefähr symmetrisch zur Jahresmitte bzw. Sommersonnenwende. Dies kann für Ca nicht bestätigt werden, wo sich ein zweites Maximum im Herbst ausbildet. Ein Herbstmaximum wurde aber ebenfalls in Na-Beobachtungen in Haute-Provence (Frankreich) gefunden [*Megie und Blamont*, 1977]. Die Schwerpunktshöhen zeigen bei allen Metallen eine ausgeprägte halbjährliche Variation. Dabei besitzt Kalium die niedrigste Schichthöhe im Winter [*Eska et al.*, 1998], Fe und Ca dagegen im Sommer [*Kane und Gardner*, 1993b; diese Arbeit]. In den Veröffentlichungen zu Natrium gibt es unterschiedliche Angaben zur jahreszeitlichen Variation der Schichthöhe [*Kane und Gardner*, 1993b; *Plane et al.*, 1999; *States und Gardner*, 1999]. Der Sommer-Winter-Unterschied ist bei Ca am stärksten ausgeprägt.

Ca^+ -Ionen wurden bereits in den 50er Jahren mit optischen Spektrometern in der unteren Thermosphäre nachgewiesen [*Vallance-Jones*, 1956], aber erst mit der Entwicklung raketengetragener Ionen-Massenspektrometer gelang ein quantitativer und höhen aufgelöster Nachweis. Die Zusammenfassung von 12 Raketensondierungen bis 1998 ist bereits in Abb. 3.5 vorgestellt worden [*Grebowsky et al.*, 1998, und Referenzen dort]. Sie zeigt unterschiedlich breite Ca^+ -Schichten, die vergleichbar mit dieser Arbeit nur oberhalb von ca. 85 km beobachtet wurden. Die Säulendichte liegt im Mittel mit $6,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ etwas höher als in Kühlungsborn.

Granier et al. [1985a] veröffentlichten die ersten Lidar-Sondierungen von Ca^+ , die im Juli 1983 in Frankreich (44°N , 6°O) stattfanden. Insgesamt 24 Beobachtungsnächte im Juli und Oktober 1983 und Juli/August 1984 wurden dann in *Granier et al.* [1989] zusammengefaßt. Im

Unterschied zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Sondierungen berichten *Granier et al.* [1989], nur in 56% der Meßdauer überhaupt Ca^+ nachgewiesen zu haben. Allerdings ist das Kühlungsborner Instrument mit einer Nachweisgrenze von ca. 2 cm^{-3} gegenüber 6 cm^{-3} [*Granier et al.*, 1989] etwas empfindlicher (jeweils nach mehrstündiger Mittelung). Sporadische Schichten wurden von *Granier et al.* [1989] in 80% der Ca^+ -Beobachtungen entdeckt. Von nicht-sporadischen, dort als „diffus“ bezeichneten Schichten wird nur in 30% aller Fälle berichtet. Dem steht eine praktisch in jeder Nacht beobachtete *quasi-permanente* Ca^+ -Schicht über Kühlungsborn gegenüber. Aufgrund des fließenden Übergangs wird hierbei allerdings nicht zwischen sporadischen und nicht-sporadischen Schichten unterschieden. Sieht man von einem mit ca. $6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (Juli 1983, *Granier et al.* [1989]) sehr extremen Wert ab, liegen die Dichten der in Frankreich gemessenen Ca^+ -Profile im Rahmen der auch in Kühlungsborn im Sommer gefundenen Schwankungen. Aus den simultanen Ca/Ca^+ -Sondierungen wird ein Verhältnis der Säulendichten Ca/Ca^+ von 1,5 angegeben [*Granier et al.*, 1989]. Im Jahresmittel ergibt sich für Kühlungsborn dagegen ein Ca/Ca^+ -Verhältnis von ca. 0,4 (alle Ca-Nächte, alle Ca^+ -Nächte).

In Urbana-Champaign (Illinois, 40°N , 88°W) erfolgten drei Einzelsondierungen von Ca^+ zu je 20 min. während zweier Nächte mit sporadischen Fe- und Na-Schichten im Dezember 1991 [*Gardner et al.*, 1993]. Die dabei gemessenen Konzentrationen liegen mit über 440 cm^{-3} erwartungsgemäß höher als der aus Nacht- und Monatsmitteln gebildete Jahreswert für Kühlungsborn. Die Extremwerte der Ca^+ -Konzentration in Tab. 3.2 und die Beispiele für sporadische Schichten (Abschnitt 5.1 und Anhang B.2) zeigen jedoch Beispiele für ähnliche Konzentrationen im hiesigen Datensatz. Die Säulendichte der Ca^+ -Profile entspricht gut dem in Kühlungsborn gemessenen Mittelwert.

Im Sommer 1995 wurden mit dem IAP-Doppellidar die geographisch nächstgelegenen Ca^+ -Sondierungen in Juliusruh/Rügen durchgeführt [*Alpers et al.*, 1996]. Neben verschiedenen sporadischen Schichten und wurde in Einzelfällen bei damals noch geringerer Empfindlichkeit auch kein Ca^+ entdeckt. Die Säulendichten und Konzentrationen lagen im Bereich der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Sommerwerte (vgl. Tab. 3.2). Insgesamt ergibt sich also eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Datensätzen.

Saisonale Variationen lassen sich aus der bei den zitierten Veröffentlichungen geringen Zahl von Ca^+ -Beobachtungen nicht ableiten. Es sind jedoch Vergleiche mit Mg^+ -Daten möglich, da für dieses Erdalkalimetall Daten aus Satellitenexperimenten zur Verfügung stehen [*Gardner et al.*, 1995; *Joiner und Aikin*, 1996]. Im Unterschied zum Ca^+ -Jahresgang in Abb. 3.2 ergeben diese Daten jährliche Variationen der Mg^+ -Säulendichte mit einem ausgeprägten Maximum im Sommer. Die mehrjährige Datenreihe zeigt eine Abhängigkeit der Mg^+ -Dichte vom 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus [*Joiner und Aikin*, 1996]. Aus dem 2-jährigen Datensatz über Kühlungsborn kann eine mehrjährige Variation aber nicht abgeleitet werden.

3.4.2 Interpretation der nächtlichen Variationen der Ca-Schicht

Die Betrachtung der Ca-Säulendichten im Abschnitt 3.3.1 zeigt allgemein eine Dichtezunahme im Verlauf der Nacht. Diese ist im Januar sehr deutlich wellenförmig ausgeprägt, jedoch auch in vielen anderen - hier nicht dargestellten - Monaten erkennbar. In den August-Werten findet man diese Zunahme nicht wieder. Dies liegt teilweise an der kurzen Beobachtungsdauer in den Sommernächten, die mehrstündige Entwicklungen vor dem Hintergrund kurzfristiger Schwankungen verbirgt. Die Sonne sinkt in Kühlungsborn im August nur für ca. 5 h ausreichend tief unter den Horizont, um Sondierungen der Ca-Schicht zu ermöglichen. Dem stehen bis zu 14-stündige Sondierungen im Januar gegenüber.

Die periodische Struktur der Säulendichteveränderungen im Januar legt einen Zusammenhang mit Gezeitenwellen von 8 oder 12 h Periode nahe. Gezeitenwellen werden in der oberen Mesosphäre in mittleren Breiten vor allem in Wind- und Temperaturdaten beobachtet. Die Wellen verursachen eine adiabatische Temperaturänderung der ausgelenkten Luftpakete, die z.B. am Standort Kühlungsborn mit einem Kalium-Temperatur-Lidar gemessen werden kann [von Zahn und Höffner, 1996]. Wellenanalysen bestätigen das Auftreten von Gezeiten, wobei auch hier die nachtgebundenen Sondierungen in den langen Winternächten bessere Resultate liefern. Ein Vergleich von Temperaturdaten und Kalium-Metall-dichten unter Einwirkung einer (kürzerperiodischen) Schwerewelle zeigt eine positive Korrelation unterhalb von ca. 90-95 km und eine negative Korrelation oberhalb von 90-95 km [Eskola und Höffner, 1998]. Die Dichteveränderungen können wie auch für Fe und Na gezeigt [Gardner und Shelton, 1985; Hickey und Plane, 1995] nahezu vollständig auf dynamische Effekte durch Verschiebungen der Schicht zurückgeführt werden.

Für die Veränderung der Ca-Dichte in Abhängigkeit von Höhe und Zeit (Abb. 3.8, Januar) würde man damit einen Phasensprung mit der Höhe bei ca. 90 km erwarten. In der höhenaufgelösten Darstellung der Ca-Dichteveränderungen vom Januar (Abb. 3.8) wird dieser Phasensprung höchstens angedeutet, in den Daten einzelner Nächte ist er im allgemeinen nicht erkennbar. Auch die August-Daten zeigen keinen Phasensprung im Bereich des Schichtmaximums. Dies ist ein Hinweis darauf, daß die Änderungen der Ca-Dichte nicht allein dynamische Ursachen haben, sondern auch chemische, z.B. über Änderungen der Temperatur und damit verbundene Verschiebungen des chemischen Gleichgewichts zwischen Ca-Atomen und Ca-haltigen Molekülen. Calcium scheint damit schneller auf Temperaturänderungen zu reagieren, als Kalium [Eskola und Höffner, 1998], Natrium [Hickey und Plane, 1995] oder Eisen [Gardner und Shelton, 1985]. Daraus ergeben sich wichtige Hinweise für die Modellierung der Ca-Schicht im Kap. 4.

Obwohl also die Auswirkungen von Gezeitenwellen auf die Ca-Schicht so nicht vorhersehbar waren, sind die beobachteten Wellen selbst durchaus typisch für die obere Mesosphäre in mittleren Breiten: Mehrjährige Windmessungen mit Atmosphärenradars zeigen ein Maximum der Amplitude der 12-stündigen Gezeit im Dezember und Januar sowie im September [Schminder et al., 1997]. Daneben werden auch 24-stündige Gezeiten beobachtet, die jedoch in mittleren Breiten eine geringere Rolle spielen. 8-stündige Gezeiten werden in den Radarson-

dierungen nur selten ermittelt [*P. Hoffmann*, persönliche Mitteilung]. Die rund 10-stündige Periode der Januar-Säulendichteveränderungen ergibt sich darum wahrscheinlich aus einer Überlagerung von ganz- und halbtägiger Gezeit. Diese Ansicht wird von der höhenaufgelösten Darstellung in Abb. 3.8 gestützt, die über fast die gesamte Metallschicht Perioden um 12 h und nur eine geringe Phasenverschiebung ergibt. Überlagerte ganztägige Wellen können aufgrund der Darstellung nicht identifiziert werden. In höheren Breiten werden 8-stündige Gezeiten im betrachteten Höhenbereich jedoch z.B. in der Höhe, Stärke oder Häufigkeit des Auftretens *Leuchtender Nachtwolken* und in Radar-Windmessungen beobachtet [*von Zahn et al.*, 1997].

Die 6-stündige Periode der Dichteänderungen im August kann ebenfalls auf Gezeitenwellen zurückgeführt werden, da neben den 24- oder 12-stündigen Wellen auch ihre Oberschwingungen ausgebildet werden. Die Phasenverschiebung von $-0,3$ h/km führt dazu, daß sich Abnahmen der Konzentration unterhalb des Schichtmaximums und Zuwächse oberhalb zu einer konstanten Säulendichte ausgleichen.

Eine allgemeine Zunahme der Ca-Dichte im Verlauf der Nacht wird auch in 6 von 10 Sondierungen über Haute-Provence bei 44°N , 6°O bestätigt, die dort einen Anstieg der Säulendichte um mindestens 20% ergeben [*Granier et al.*, 1989]. In zwei Nächten zeigte sich eine Abnahme der Dichte. Auch am Standort Kühlungsborn gemessene Kalium-Profile ergaben eine Zunahme der Dichte während der Nacht [*Höffner et al.*, 1999]. Aus umfangreichen Untersuchungen der Na-Schicht nennen *Gardner et al.* [1986] eine im Jahresdurchschnitt um fast 50% innerhalb von ca. 7 Stunden ansteigende Säulendichte. Andere, ebenfalls in mittleren Breiten durchgeführte Na-Messungen zeigen einen Anstieg der Säulendichte ab Mitternacht mit schwankenden Werten in den ersten Abendstunden (Juli bis September, nach *Gardner et al.* [1986]). Datensätze aus anderen geographischen Breiten zeigen keine klare Entwicklung im Verlauf der Nacht. In allen Veröffentlichungen werden Gezeitenwellen und damit verbundene Temperaturänderungen für den Anstieg der Säulendichten verantwortlich gemacht. Auch ohne dynamische Ursachen wurde für Na ein monotoner nächtlicher Dichteanstieg aus der Rekombination während des Tages produzierter Ionen gefunden [*States und Gardner*, 1999]. Ein sehr allgemeines Modell für die Metallschicht bestätigt den nächtlichen Anstieg der Metallichten qualitativ [*Granier et al.*, 1985b]

Der in der Literatur häufig beschriebene Einfluß langperiodischer Wellen auf die Metallichte wird durch den Kühlungsborner Ca-Datensatz also qualitativ bestätigt, wobei aber nur einzelne Nächte bzw. Monatsmittel eine eindeutige Wellenstruktur zeigen, wie sie auch mit anderen Instrumenten beobachtet wird. Die höhenaufgelöste Betrachtung der Schichtveränderungen gibt Hinweise darauf, daß Wellen die Ca-Schicht nicht nur dynamisch verändern, sondern über Temperaturänderungen auch chemische Reaktionen beeinflussen.

4 Modellierung der ungestörten Ca-Schicht

Im Kapitel 3 wurden die jahreszeitlichen Variationen der Ca-Schicht über Kühlungsborn anhand eines 2-jährigen Datensatzes beschrieben. Dabei wurden Unterschiede zu anderen atmosphärischen Metallen u.a. in Bezug auf die Metaldichte und die jahreszeitlichen Dichteänderungen gefunden. In diesem Kapitel werden die Vorgänge innerhalb der Ca-Schicht sowie die Ursachen der jahreszeitlichen Variation anhand eines Modells der chemischen Zusammenhänge untersucht.

In den ersten Modellen atmosphärischer Metallschichten (z.B. *Gadsden* [1970], *Richter und Sechrist* [1979] oder *Hunten* [1981]) konzentrierten sich die Autoren auf die Na-Chemie, da dieses Metall einerseits am intensivsten beobachtet wurde (vgl. Kap. 1), andererseits die Gas-Chemie aufgrund des relativ geringen Siedepunktes im Labor gut untersucht werden konnte. Basierend auf Laborexperimenten (u.a. *Plane und Helmer* [1994]) geben heute verschiedene zeitunabhängige Modelle die Eigenschaften der nächtlichen Na-Schicht in verschiedenen geographischen Breiten gut wieder [*McNeil et al.*, 1995; *Plane et al.*, 1998 und 1999]. Die Erdalkalimetalle wie Mg und Ca sind demgegenüber im Labor sehr viel schwieriger zu untersuchen. Hier lagen zunächst nur Ergebnisse zum X/XO-System vor ($X = \text{Mg, Ca}$) [*Plane und Nien*, 1990; *Plane und Helmer*, 1995; *Helmer et al.*, 1993] sowie theoretische, vergleichende Betrachtungen [*Plane*, 1991 und 1992]. Diese Werte wurden von *McNeil et al.* [1998a] in einem ersten Ca-Modell zur Beschreibung der nächtlichen atmosphärischen Ca- und Ca^+ -Säulendichte benutzt.

In allen Modellen wird kosmischer Staub als Quelle der atmosphärischen Metallschicht verwendet, der in Mengen von ca. 110 Tonnen pro Tag in die Atmosphäre eingetragen wird [*Love and Brownlee*, 1993]. Andere Quellen wie z.B. Seesalz-Aerosole, die diffusiv bis in Mesopausenhöhe transportiert werden können, sind als zu schwach für die existierende mesosphärische Metallschicht bewertet worden [*Junge et al.*, 1962]. Ein von *Hunten et al.* [1980] etabliertes Modell zur Ablagerung kosmischen Staubes beschreibt die Höhenverteilung eines Metalls allgemein. Die Stärke oder *Effektivität* der Quelle wird jedoch in verschiedenen Metall-Modellen nicht quantitativ berechnet, sondern als skalierbarer Parameter an die im Modell gewünschte atmosphärische Metallkonzentration angepaßt [*Plane*, 1991; *Helmer et al.*, 1998; *Plane et al.*, 1998 und 1999; *Eska et al.*, 1999]. Dies betrifft auch das in der Atmosphäre im Vergleich zur angenommenen Quelle stark abgereicherte Calcium (vgl. Abb. 6.2). Der für das vorliegende Ca-Modell notwendige Skalierungsfaktor wird jedoch zumindest zum Teil mit der im Kap. 6 beschriebenen *Abreicherung* von Ca in Meteoroidenspuren erklärt.

4.1 Die Funktionsweise des Ca-Modells

Die Abläufe innerhalb der atmosphärischen Ca-Schicht sollen mit Hilfe eines eindimensionalen, zeitunabhängigen Chemie-Modells nachgebildet und untersucht werden. Das Modell berücksichtigt keine Transportvorgänge von Metallen in das Beobachtungsvolumen oder daraus heraus. Es basiert auf der Struktur des von *Plane* [1991] veröffentlichten und mehrfach

überarbeiteten Na-Modells (u.a. *Plane und Helmer* [1994], *Plane et al.* [1999]). Das ursprünglich in der Programmiersprache *Basic* geschriebene Modellprogramm wurden dazu an die in der Ca-Chemie zu berücksichtigenden Reaktionen angepaßt und für die Programmiersprache *Delphi 3* modernisiert. Die Realisierung in *Delphi* bot Vorteile bei der Ausgabe der Modell-Ergebnisse, der Anpassung variabler Parameter (Ratenkoeffizienten, saisonale Quellstärke, Temperaturprofile) zur Laufzeit des Programms sowie der langfristigen Verwendung (leichte Anpassung des Programmcodes für andere Metalle, Einbindung in eine innerhalb der Arbeitsgruppe verbreitete Programmbibliothek).

4.1.1 Der Modell-Formalismus

Im Ca-Modell wird der Höhenbereich zwischen 65 und 110 km Höhe mit einer Höhenauflösung von 0,5 km jeweils monatsweise betrachtet. Insgesamt enthält das Modell 10 verschiedene Ca-Spezies (Ca, CaO, CaO₂, CaO₃, CaOH, Ca(OH)₂, CaCO₃, Ca⁺, CaO⁺, Ca.X⁺ mit X=N₂, O₂) und 10 Reaktionspartner (O, O₂, O₃, N₂, H, H₂O, CO₂, NO⁺, O₂⁺, e⁻), die über 25 Reaktionen miteinander im chemischen Gleichgewicht stehen (siehe Abschnitt 4.2). Bei einer Kanalbreite von 0,5 km läuft die vertikale Durchmischung sehr viel langsamer ab als die chemische Umsetzung, weshalb sie für die Ca-Chemie nicht berücksichtigt werden muß [*Plane et al.*, 1998]. So beträgt die Lebensdauer von Ca und Ca⁺ bezüglich vertikaler Durchmischung rund 10-100 h, bezüglich der wichtigsten chemischen Reaktion aber jeweils nur zwischen 0,1 und 100 s. Aufgrund ähnlich schneller Gegenreaktionen stellt sich dann in jedem Höhenkanal ein chemisches Gleichgewicht ein. Dazu werden später die Geschwindigkeiten der einzelnen Reaktionen verglichen (vgl. Abb. 4.4).

Unter diesen Voraussetzungen kann man in jeder Höhe eine Kontinuitätsgleichung zur Beschreibung der Teilchenzahldichten n_i der verschiedenen Ca-Spezies i ansetzen:

$$\frac{dn_i}{dt} = P_i - V_i + S - \nabla \Phi_i \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnen P_i und V_i chemische Produktion und Verluste, S den Eintrag durch kosmischen Staub und Φ_i den vertikalen Massenfluß der einzelnen Spezies. Diese Gleichung gilt für jede einzelne Spezies, außerdem ist nach Voraussetzung die Summe aller Ca-Spezies $n(Ca)$ gleich der gesamten eingetragenen Ca-Menge. Die Gleichungen lassen sich damit addieren zu

$$\frac{dn(Ca)}{dt} = \sum_i (S - \nabla \Phi_i) \quad (4.2)$$

wobei im Gleichgewicht $dn(Ca)/dt = 0$ gilt. Da die chemische Umwandlung der einzelnen Spezies ineinander schneller ist als die vertikale Durchmischung, wird der vertikale Fluß Φ gleichermaßen für alle Ca-Spezies durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\Phi(Ca) = -K_E \left(\frac{dn(Ca)}{dz} + n(Ca) \cdot \left(\frac{1}{H} + \frac{dT}{T dz} \right) \right) \quad (4.3)$$

mit

- K_E vertikale Komponente der Eddy-Diffusion als wichtigster Beitrag zur Durchmischung,
 H atmosphärische Skalenhöhe,
 T Temperatur,
 z Höhe.

Molekulare Diffusion spielt erst oberhalb von ca. 105 km Höhe, also am oberen Modellrand eine größere Rolle, so daß sie hier nicht berücksichtigt wird. Für die Massenerhaltung muß der (hier nach unten gerichtete) vertikale Fluß gleich dem von oben bis in die betrachtete Höhe z integrierten Masseneintrag durch verdampfende Meteoroiden sein, so daß sich die Gleichung 4.2 für die Gesamt-Teilchenzahldichte $n(\text{Ca})$ für jede Höhe z lösen läßt.

4.1.2 Vertikale und saisonale Verteilung von Metall-Eintrag und Diffusion

Die Ablagerung kosmischen Staubes wird im Modell durch ein Profil beschrieben, das nach *McNeil et al.* [1998a] für eine bimodale Geschwindigkeitsverteilung der einfallenden Meteoroiden berechnet wurde (2 % des Masseneintrags durch Partikel mit $v_g = 30$ km/s, sonst $v_g = 15$ km/s). Das schwer flüchtige Ca verdampft danach erst bei höheren Temperaturen aus Meteoroiden als Fe oder Alkalimetalle. Deswegen wird hier statt des Jahresgangs der Ablagerung kosmischen Staubes aus sporadischen Quellen [*Hughes*, 1978] ein veränderter Jahresgang verwendet, der den Masseneintrag durch Schauer schneller Meteoroiden stärker berücksichtigt und Maxima im Mai, August und November zeigt (Abb. 4.1) [*Jenniskens*, 1994; *Rendtel et al.*, 1995].

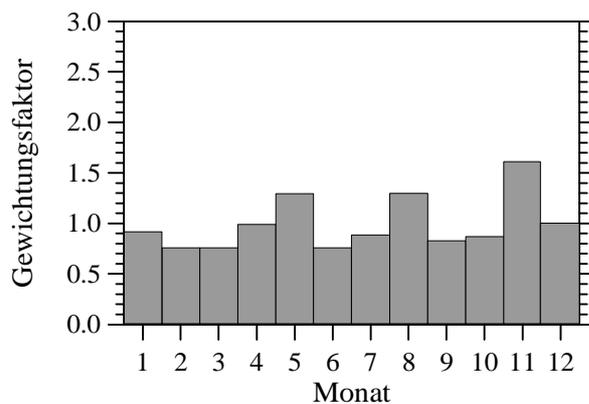


Abb. 4.1: Saisonale Variation der im Ca-Modell verwendeten meteoroidischen Quelle

Wie im Kap. 6 ausführlich erläutert, erreichen Partikel aus Meteorschauern aufgrund ihres im Vergleich zum typischen kosmischen Staub meist größeren Durchmessers und höherer Geschwindigkeiten beim Eintritt in die Atmosphäre höhere Temperaturen. Um die unterschiedlichen Verdampfungshöhen schneller und langsamer Partikel zu berücksichtigen, wird das Höhenprofil in Monaten starker Meteor-Aktivität um 10 km nach oben verschoben.

Durch den Skalierungsfaktor von 0,01 wird

der über alle Höhen integrierte Fluß an den Anteil des tatsächlich aus kosmischem Material verdampfenden Calciums an die Beobachtungen angepaßt und mit $53 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ festgelegt. Durch direkte Beobachtungen von Spuren verdampfter Meteoroiden kann dieser Faktor teilweise erklärt werden, wie im Kap. 6 beschrieben wird.

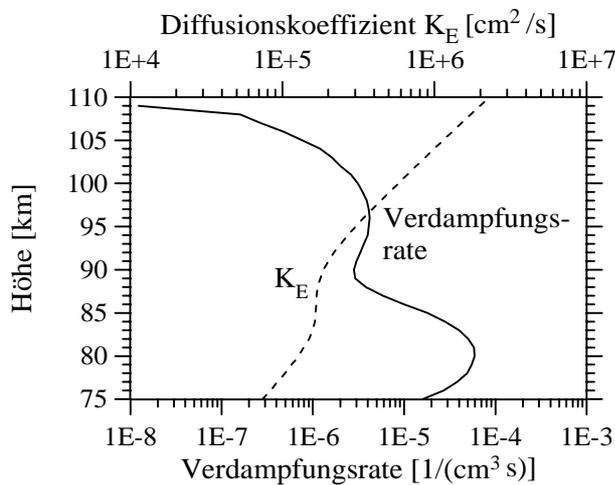


Abb. 4.2: Vertikales Profil der Ablagerung von Ca aus kosmischem Staub und des Eddy-Diffusionskoeffizienten K_E (jeweils Jahresmittel)

Der Eddy-Diffusionskoeffizient K_E ist im betrachteten Höhenbereich nur ungenau bekannt und Gegenstand der aktuellen Forschung. Im vorliegenden Ca-Modell wird das K_E -Höhenprofil aus dem zwei-dimensionalen Modell von *Garcia und Solomon* [1994] verwendet, die saisonale Variation ist nach Modellen von *Ebel* [1980] qualitativ angepaßt (Abb. 4.2). Die vertikale Verteilung des Calciums wird außerdem durch die Summe aller Ca-Konstituenten am unteren Rand des Modells bei 65 km festgelegt. Die Normierung erfolgte hier auf einen Wert von $2,1 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$.

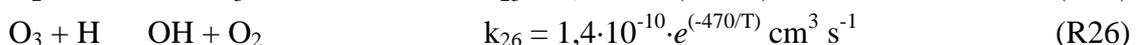
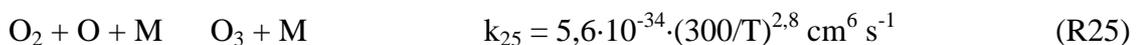
4.2 Das System der chemischen Reaktionen

4.2.1 Die Konzentrationen der Reaktionspartner

Im Ca-Modell werden insgesamt 25 Reaktionen für die Bestimmung der Gleichgewichtskonzentrationen von Ca, Ca^+ usw. betrachtet (siehe Tab. 4.1). Die für die Modellierung notwendigen Konzentrationen der Reaktionspartner wurden Standardatmosphären oder Modelldaten entnommen. Die Daten wurden einheitlich für die geographische Position von Kühlungsborn, den 15. eines Monats und lokale Mitternacht interpoliert. Im einzelnen stammen

- die Mischungsverhältnisse von H, CO_2 , O und O_2 sowie die Atmosphärendichte aus dem Atmosphären-Modell von *Garcia und Solomon* [1983, 1994],
- das Mischungsverhältnis von H_2O aus Daten des *Microwave Limb Sounders* auf dem *UARS*-Satelliten [*Pumphrey und Harwood*, 1997],
- die Konzentrationen von Elektronen, O_2^+ und NO^+ aus der *International Reference Ionosphere IRI95* [*Bilitza et al.*, 1993],
- die Konzentration des Ozons aus einer Berechnung innerhalb des vorliegenden Modells.

Die Ozonkonzentration wird im betrachteten Höhenbereich vor allem durch die Reaktionen mit atomarem Sauerstoff und Wasserstoff gesteuert:



Beide Reaktionskoeffizienten [*DeMore et al.*, 1994] sind abhängig von der Temperatur T . Durch Berechnung der O_3 -Konzentration aus der im Modell verwendeten Temperatur erhält man also ein besseres Ergebnis als durch Übernahme der Werte aus separaten Atmosphären-

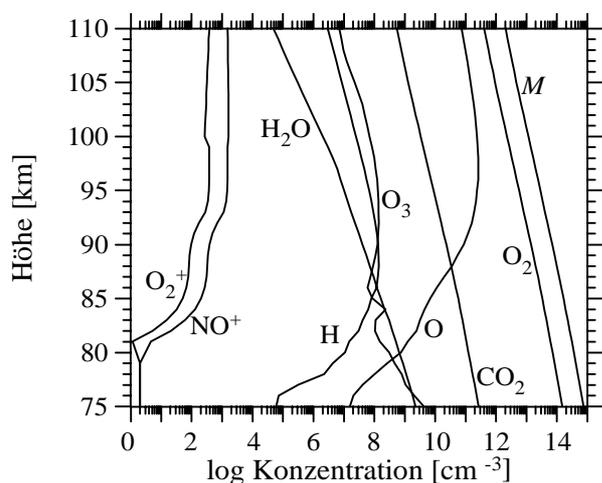


Abb. 4.3: Höhenprofil der Konzentration der im Ca-Modell verwendeten Spurengase und der Gesamt-Luftdichte (M) für den Standort Kühlungsborn im Jahresmittel

gesamten Höhenbereich des Modells ab und wurden mit einem aus MSIS-E-90 [Hedin, 1990] ermittelten Temperaturgradienten extrapoliert.

4.2.2 Die betrachteten Reaktionen und ihre Koeffizienten

Die Tabelle 4.1 listet die Reaktionskoeffizienten k_j für die im Ca-Modell verwendeten Reaktionen auf. Die Quellenangaben zeigen, daß für Ca erst ein Teil der Koeffizienten direkt gemessen wurden (z.B. k_1 bis k_4 , k_9 und k_{11}). Andere Werte sind von aus Messungen der gleichen Reaktionen mit Metallen wie Mg, Fe oder Na übernommen und ggf. angepaßt worden. Einige Reaktionen (wie die um CaOH) sind unter anderen Umgebungsbedingungen untersucht worden, z.B. in Flammen.

Aus dem Produkt von Reaktionskoeffizient und der Konzentration der weiteren Edukte erhält man die Reaktionsgeschwindigkeit. Aus diesen Werten kann man die wichtigsten Reaktionen des Ca-Zyklus ablesen. In Abb. 4.4 ist der Reaktionszyklus schematisch dargestellt. Die Pfeile zeigen die Richtung der Reaktion an, die Pfeildicke symbolisiert die Reaktionsgeschwindigkeit in 90 km Höhe, die Farbe die Temperaturabhängigkeit (rot: negative Abhängigkeit, schwarz: positive Abhängigkeit). Neben den Pfeilen sind die zusätzlichen Reaktionspartner angegeben. Der atomare Sauerstoff bewirkt durch seine große Reaktivität jeweils sehr schnelle Reaktionen (R2, R5 und R12), die insgesamt zu einer Bildung von Ca aus seinen temporären Senken führen. Die Zunahme der O-Konzentration um einen Faktor 10 über 5 km bestimmt damit die scharfe Unterkante der Ca-Schicht. Wasser führt über die Reaktionen von CaO und CaO₃ zu Ca(OH)₂ zu einem Abbau von Ca (R8 und R10). Neben Ca(OH)₂ bildet das Calciumcarbonat CaCO₃ eine chemische Senke für Calcium, die Bildungsreaktion R11 mit CO₂ überwiegt den Abbau durch Reaktionen mit O oder H₂O (R13 und R14) bei weitem.

modellen. Die Abb. 4.3 gibt einen Überblick über die Konzentrationen der verschiedenen Spurengase.

In das Modell geht außerdem die Temperatur in der Höhe z ein, die u.a. für die Berechnung der Gesamt-Luftdichte aus dem Luftdruck und der Spurengaskonzentrationen aus den Mischungsverhältnissen benötigt wird. Am Standort Kühlungsborn werden die Temperaturen in Höhe der Metallschicht vom IAP-K-Lidar [von Zahn und Höffner, 1996] gemessen, wobei die Sondierungen meistens parallel zu den hier beschriebenen Ca-Sondierungen stattfanden. Die gemessenen Temperaturprofile deckten nicht den

Tab. 4.1: Im Ca-Modell berücksichtigte Reaktionen und Reaktionskoeffizienten. Ein Punkt zwischen zwei Elementen bezeichnet eine Komplexbindung, *M* ist ein beliebiger Stoßpartner.

Nummer	Reaktion	Reaktionskoeffizient $k^a)$	Quelle $b)$
<i>Neutral-Reaktionen</i>			
R1	Ca + O ₃ → CaO + O ₂	$8,23 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-192/T}$	1
R2	CaO + O → Ca + O ₂	$3,2 \cdot 10^{-10} \cdot (T/200)^{0,5}$	2
R3	Ca + O ₂ + M → CaO ₂ + M	$9,7 \cdot 10^{-30} \cdot e^{-451/T}$	3
R4	CaO + O ₃ → CaO ₂ + O ₂	$2,0 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-327/T}$	4
R5	CaO ₂ + O → CaO + O ₂	$5 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-200/T}$	5
R6	CaOH + H → CaO + H ₂	$4 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-3680/T}$	6
R7	CaOH + H → Ca + H ₂ O	$3 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-200/T}$	6
R8	CaO + H ₂ O + M → Ca(OH) ₂ + M	$1,08 \cdot 10^{-24} \cdot (T/200)^{-1,21}$	4
R9	CaO + O ₂ + M → CaO ₃ + M	$1,0 \cdot 10^{-27} \cdot (T/200)^{-1}$	4
R10	CaO ₃ + H ₂ O → Ca(OH) ₂ + O ₂	$6 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-200/T}$	7
R11	CaO + CO ₂ + M → CaCO ₃ + M	$1,08 \cdot 10^{-26} \cdot (T/200)^{-0,88}$	4
R12	CaO ₃ + O → CaO ₂ + O ₂	$4 \cdot 10^{-10} \cdot (T/200)^{0,5}$	7
R13	CaCO ₃ + O → CaO ₂ + CO ₂	$1 \cdot 10^{-16} \cdot e^{-200/T}$	8
R14	CaCO ₃ + H ₂ O → Ca(OH) ₂ + CO ₂	$1,15 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-1000/T}$	8
R15	Ca(OH) ₂ + H → CaOH + H ₂ O	$3 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-300/T}$	6
<i>Ionen-Reaktionen</i>			
R16	Ca + hv → Ca ⁺ + e ⁻	$1 \cdot 10^{-10}$	9
R17	Ca + O ₂ ⁺ → Ca ⁺ + O ₂	$1,8 \cdot 10^{-9}$	10
R18	Ca + NO ⁺ → Ca ⁺ + NO	$4,0 \cdot 10^{-9}$	10
R19a	Ca ⁺ + O ₂ + M → Ca·O ₂ ⁺ + M	$6,6 \cdot 10^{-30} \cdot (T/300)^{-1,8}$	11
R19b	Ca ⁺ + N ₂ + M → Ca·N ₂ ⁺ + M	$2,0 \cdot 10^{-30} \cdot (T/300)^{-1,52}$	12
R20	Ca ⁺ + O ₃ → CaO ⁺ + O ₂	$4,9 \cdot 10^{-10} \cdot (T/300)^{0,5}$	13
R21	Ca·X ⁺ + O → CaO ⁺ + X	$1 \cdot 10^{-10}$	8
R22	CaO ⁺ + O → Ca ⁺ + O ₂	$3,33 \cdot 10^{-11} \cdot e^{94/T}$	7
R23	Ca·X ⁺ + e ⁻ → Ca + X (X = O ₂ , N ₂)	$1 \cdot 10^{-7} \cdot (200/T)^{0,5}$	8
R24	CaO ⁺ + e ⁻ → Ca + O	$8,0 \cdot 10^{-8} \cdot (200/T)^{0,5}$	7

^{a)} Dimension der Ratenkoeffizienten: photochemische Reaktionen s⁻¹, bimolekulare Reaktionen cm³ s⁻¹, termolekulare Reaktionen cm⁶ s⁻¹

^{b)} 1. Helmer et al. [1993], 2. Plane und Nien [1990], 3. Nien et al., 1993, 4. J. M. C. Plane und R. J. Rollason [University of East Anglia, persönliche Mitteilung], 5. Helmer und Plane [1993]; 6. gemessen in Flammen Jensen und Jones [1978], 7. angepaßt, 8. abgeschätzt aus analoger Reaktion anderer Metalle, 9. Swider [1970], 10. Rutherford et al. [1972], 11. Ferguson und Fehsenfeld [1968], 12. Rollason und Plane [1998], 13. Rowe et al. [1981]

Die ionisierten Spezies sind über verschiedene schnelle Reaktionen miteinander gekoppelt (R19a/b bis R24). Mit der Höhe nimmt aber die Geschwindigkeit der *termolekularen* Reaktionen R19a und R19b exponentiell ab, so daß sich die Produktion von Ca^+ aus CaO^+ über die Reaktion R22 mit atomarem Sauerstoff durchsetzt. In geringem Maß werden Calcium-Atome wieder durch dissoziative Rekombination von Ca.X^+ und CaO^+ gebildet, die direkte Rekombination von Ca^+ mit e^- spielt praktisch keine Rolle [Bates und Dalgarno, 1962]. Insgesamt ist die Kopplung von Ionen und Ca-Atomen schwach. Es wurde jedoch keiner der Ratenkoeffizienten der Ionenreaktionen für Calcium unter Bedingungen der oberen Atmosphäre gemessen, so daß sie insgesamt unsicher sind und z.T. bei der Modellierung an die beobachteten Ca- und Ca^+ -Schichten angepaßt wurden (vgl. Tab. 4.1).

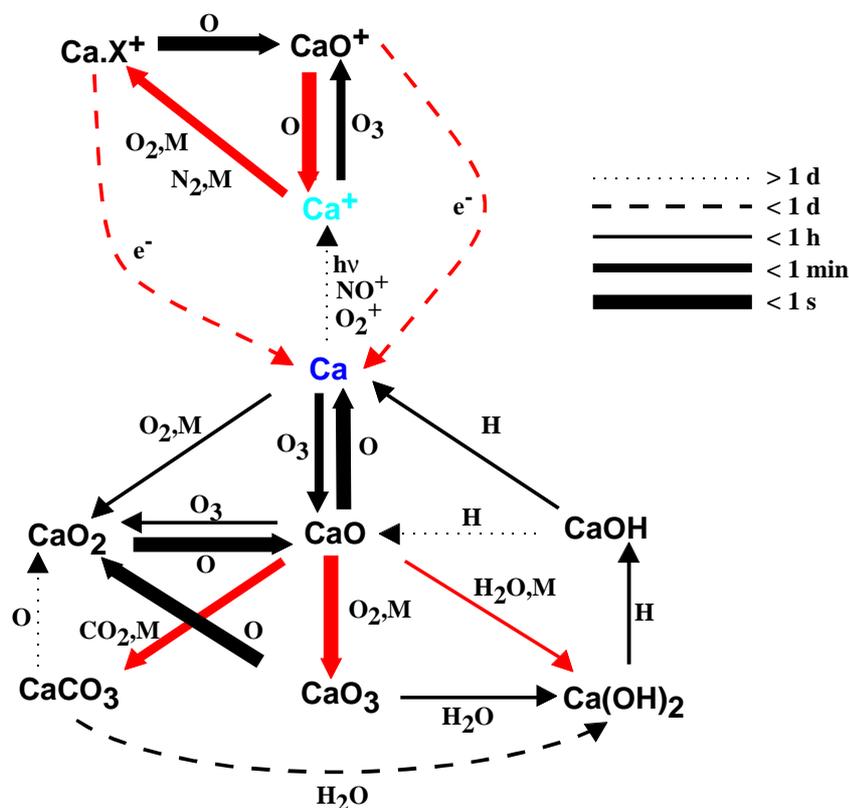


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der im Ca-Modell enthaltenen Reaktionen. Die roten Pfeile symbolisieren Reaktionen mit $dk/dT < 0$ (k Ratenkoeffizient, T Temperatur). Die Geschwindigkeitsangaben gelten für 90 km Höhe.

4.2.3 Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Reaktionen

Die Geschwindigkeit der im Modell berücksichtigten chemischen Reaktionen hängt von den Ratenkoeffizienten und bei bi- oder termolekularen Reaktionen auch von den Konzentrationen der Reaktionspartner ab. Die meisten Konzentrationen der betrachteten Spurengase sind dem zwei-dimensionalen Modell von *Garcia und Solomon* [1983 und 1994] entnommen und nur zum Teil durch Messungen punktuell überprüft worden. In Tab. 4.2 werden die Änderungen verschiedener Schichtparameter im Jahresmittel bei Änderung einzelner Spurengaskonzentrationen auf die Hälfte oder das doppelte des ursprünglichen Wertes gegenübergestellt. Die

Gase N_2 und O_2 werden nicht betrachtet, da diese bis mindestens in ca. 100 km Höhe ein konstantes Mischungsverhältnis besitzen, ebensowenig das Ozon, dessen Dichte im Modell über die Reaktionen R25 und R26 gesteuert wird. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Ca-Dichte von den meisten Spurengaskonzentrationen, die jedoch kaum die *Höhe* des Schichtmaximums beeinflussen. Die geringste Abhängigkeit besteht von der Konzentration des atomaren Sauerstoffs, da die Ca-abbauenden Reaktionen mit O_3 schneller ablaufen als die Ca-bildenden Reaktionen mit O. Elektronen und die Ionen O_2^+ und NO^+ wurden zusammengefaßt, heben sich in ihren Auswirkungen auf die Ca-Schicht jedoch genau auf. Eine Erhöhung der Elektronendichte alleine verursacht einen Anstieg der Ca-Säulendichte um 21 %. Im Mittel ist die Ca-Dichte positiv temperaturabhängig, so daß im chemischen Gleichgewicht bei steigenden Temperaturen Ca- und Ca^+ -Dichte ansteigen.

Die Ca^+ -Säulendichte zeigt fast immer eine geringere Abhängigkeit von Spurengas- und Temperaturänderungen, da sie vor allem von der Ca-Dichte, der nicht veränderten O_2 - und N_2 -Dichte sowie der O-Konzentration abhängt. Über die Reaktionen R21 und R22 beeinflusst die O-Konzentration die Ca^+ -Ionendichte stärker als die Dichte des neutralen Calciums. Änderungen der O-Konzentration wirken sich also vor allem auf die Ca^+ -Ionendichte aus, Änderungen der Konzentration atomaren Wasserstoffs und der Ladungsträgerdichte auf Ca-Atome und abgeschwächt auch auf Ca^+ -Ionen. Variationen der H_2O - und CO_2 -Dichte beeinflussen überwiegend die Ca-Atomdichte und nur über deren Änderung die Ca^+ -Ionendichte. Insgesamt demonstrieren die dargestellten Variationen die Wichtigkeit präziser Spurengas- und Temperaturmessungen für das Verständnis der Metallchemie in der oberen Atmosphäre.

Tab. 4.2: Änderung von Säulendichte und Schichtmaximum der Ca-Schicht sowie der Säulendichte der Ca^+ -Ionenschicht bei Änderung der Konzentration atmosphärischer Spurengase sowie der Temperatur

	Änderung der Ca-Säulendichte [%]	Änderung der Höhe des Maximums [km]	Änderung der Maximaldichte [%]	Änderung der Ca^+ -Säulendichte [%]
[O] · 2	-6	-0.5	-4	16
[O] · 0.5	7	1.0	4	-16
[H] · 2	30	-0.5	39	13
[H] · 0.5	-23	1.5	-31	-18
[H_2O] · 2	22	-0.5	32	5
[H_2O] · 0.5	-23	1.0	-26	-5
[CO_2] · 2	-27	1.0	-30	-8
[CO_2] · 0.5	31	-0.5	40	7
[Ladungsträger] · 2	0	0.0	0	0
[Ladungsträger] · 0.5	0	0.0	0	0
$T + 10$ K	17	-0.5	27	9
$T - 10$ K	-17	1.0	-23	-10

Daneben werden die Ca- und die Ca⁺-Schichten durch die Ratenkoeffizienten selbst beeinflusst. Die Änderungen bei Verdoppelung des Ratenkoeffizienten sind oft geringer als bei Änderung der Spurengaskonzentrationen, da letztere meistens mehrere Reaktionen gleichzeitig betreffen. Wie Tabelle 4.3 auflistet, sind die Änderungen der Schichthöhe wieder praktisch vernachlässigbar und liegen meist im Bereich der Höhenauflösung des Modells (0,5 km). Zwei der vier im Modell *angepaßten* Ratenkoeffizienten ändern bei Verdopplung die Ca-Dichte um

Tab. 4.3: Empfindlichkeit der modellierten Schichtparameter von Ca-Schicht und Ca⁺-Ionenschicht für die Verdoppelung der Ratenkoeffizienten

Reaktion	Änderung der Ca- Säulendichte [%]	Änderung der Höhe des Maximums [km]	Änderung der Maximal- dichte [%]	Änderung der Ca ⁺ - Säulendichte [%]
R1 Ca + O ₃ CaO + O ₂	-26	1.0	-30	-8
R2 CaO + O Ca + O ₂	35	-0.5	41	7
R3 Ca + O ₂ + M CaO ₂ + M	-6	0.5	-3	0
R4 CaO + O ₃ CaO ₂ + O ₂	0	0.0	0	0
R5 CaO ₂ + O CaO + O ₂	0	0.0	0	0
R6 CaOH + H CaO + H ₂	0	0.0	0	0
R7 CaOH + H Ca + H ₂ O	2	0.0	1	0
R8 CaO + H ₂ O + M Ca(OH) ₂ + M	-1	0.0	-1	0
R9 CaO + O ₂ + M CaO ₃ + M	-1	0.0	0	0
R10 CaO ₃ + H ₂ O Ca(OH) ₂ + O ₂	-1	0.0	0	0
R11 CaO + CO ₂ + M CaCO ₃ + M	-27	1.0	-30	-8
R12 CaO ₃ + O CaO ₂ + O ₂	1	0.0	0	0
R13 CaCO ₃ + O CaO ₂ + CO ₂	2	0.5	3	2
R14 CaCO ₃ + H ₂ O Ca(OH) ₂ + CO ₂	26	-0.5	34	5
R15 Ca(OH) ₂ + H CaOH + H ₂ O	3	0.0	1	0
R16 Ca + hv Ca ⁺ + e ⁻	0	0.0	0	0
R17 Ca + O ₂ ⁺ Ca ⁺ + O ₂	-3	0.0	-1	3
R18 Ca + NO ⁺ Ca ⁺ + NO	-17	-0.5	-9	20
R19a Ca ⁺ + O ₂ + M Ca.O ₂ ⁺ + M	7	0.5	5	-8
R19b Ca ⁺ + N ₂ + M Ca.N ₂ ⁺ + M	7	0.5	5	-9
R20 Ca ⁺ + O ₃ CaO ⁺ + O ₂	9	0.5	3	-9
R21 Ca.X ⁺ + O CaO ⁺ + X	-4	0.0	-3	5
R22 CaO ⁺ + O Ca ⁺ + O ₂	-12	0.0	-5	14
R23 Ca.X ⁺ + e ⁻ Ca + X (X=O ₂ ,N ₂)	6	0.5	4	-7
R24 CaO ⁺ + e ⁻ Ca + O	17	0.5	3	-17

mehr als 10 % (Ionenreaktionen k22, k24). Unter allen wichtigen Reaktionen finden sich sowohl schnelle (z.B. k1 (-26 %) und k2 (+35 %)) als auch langsame (z.B. k14 und k24 mit 26 % bzw. 17 %) Reaktionen. Die Reaktionen R4 bis R6 haben praktisch keinen Einfluß auf die Ca- und Ca⁺-Konzentrationen, da die von ihnen bewirkten Veränderungen von Konzentrationsänderungen anderer Moleküle aufgefangen wird. Die Reaktion R16 ist aufgrund der im größten Teil der nächtlichen Beobachtungszeit fehlenden Sonneneinstrahlung zu langsam, um Veränderungen der Ca- oder Ca⁺-Dichte zu bewirken. Trotz ihrer geringen Reaktionsgeschwindigkeit sind die Kopplungsreaktionen zwischen ionisiertem und neutralem Calcium (R18 für Ladungsaustausch und R24 für dissoziative Rekombination von CaO⁺) für die Modellierung der *neutralen* Calcium-Schicht sehr wichtig. Dies beweist noch einmal die Bedeutung der gleichzeitigen Sondierung von Atom *und* Ion eines Elements für das Verständnis der Metallschicht.

4.3 Ergebnisse des Ca-Modells

4.3.1 Die modellierten Ca- und Ca⁺-Schichten

Zur Modellierung der atmosphärischen Ca-Schicht wurden die noch nicht im Labor gemessenen Ratenkoeffizienten so angepaßt, daß die Schicht im Jahresmittel möglichst gut abgebildet wurde. Im Unterschied zu bestehenden Metall-Modellen für Natrium [Plane, 1991; McNeil et al., 1995; Plane et al., 1999], Eisen [Helmer et al., 1998] und Kalium [Eska et al., 1999] ist hier neben dem Metall-Atom auch noch das Metall-Ion (Ca⁺) aus Lidar-Sondierungen bekannt. Die beobachtete Höhenverteilung der Ca⁺-Ionen kann jedoch wie im Kap. 3 beschrieben nicht als Gleichgewichtsverteilung angesehen werden. Vielmehr ist das Ca⁺-Profil stark von sog. *sporadischen Schichten* geprägt, die im folgenden Kap. 5 mit elektrischen und magnetischen Feldern sowie Windfeldern in Verbindung gebracht werden. Diese zusätzlichen Parameter können aber in einem eindimensionalen Ca-Modell nicht sinnvoll reproduziert werden. Außerdem wächst der Ca⁺-Anteil am gesamten Calcium mit der Höhe. Mit zunehmender Höhe steigt aber auch der Einfluß der molekularen Diffusion, die vom Modell aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt wird. Die Unterkante der Ca⁺-Schicht dagegen ist nicht von sporadischen Schichten geprägt, sondern von einem mit der Höhe veränderlichen Gleichgewicht mit CaO⁺ und Ca (siehe Abb. 4.5). Die Ratenkoeffizienten R22 und R24 dienen zur Anpassung der Ca⁺-Unterkante im Modell. Die so erhaltenen Werte sind bereits in Tab. 4.1 genannt worden. Abb. 4.5 zeigt die Jahresmittel für Ca, Ca⁺ und die wichtigsten Ca-Moleküle, Abb. 4.6 vergleicht die modellierten Jahresmittel von Ca und Ca⁺ mit den experimentell ermittelten Profilen.

In Abb. 4.5 erkennt man die verschiedenen chemischen Ca-Senken, die unterhalb von 89 km dominieren. Oberhalb von 91 km liegt Calcium meist in ionisierter Form vor. Das Ca-Atom stellt also nur zwischen 89 und 91 km den größten Anteil an allen Ca-Spezies. Abbildung 4.6 zeigt geringe Abweichungen von ca. 10 % zwischen Modell und Experiment in der Ca-Konzentration im Schichtmaximum. Diese Abweichungen liegen jedoch trotz des relativ großen Datensatzes im Bereich der beobachteten jährlichen Schwankungsbreite. Die leicht

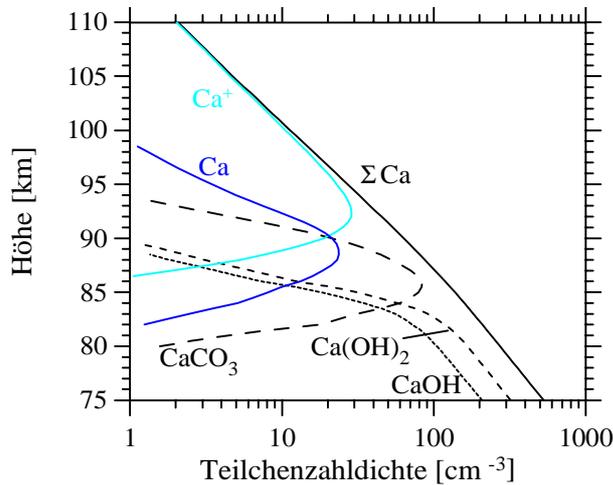


Abb. 4.5: Mittlere Profile der wichtigsten Ca-Spezies und der Ca-Gesamtmenge

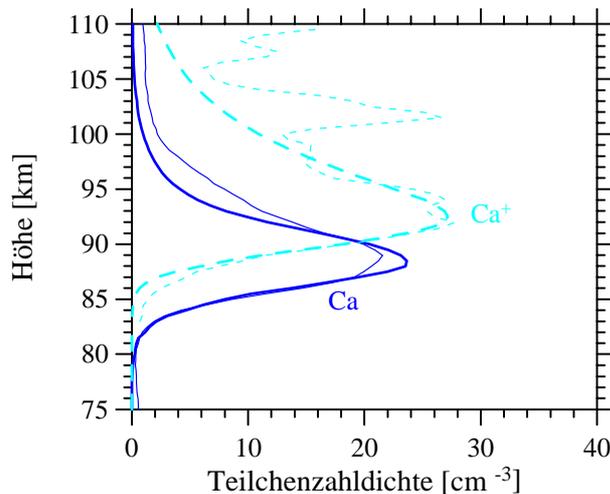


Abb. 4.6: Jahresmittel von Ca und Ca⁺ im Vergleich zwischen Experiment (dünn) und Modell (dick). Die über 90 km Höhe bestehenden Abweichungen zwischen den beiden Ca⁺-Profilen sind auf sporadische Schichten zurückzuführen.

erhöhte beobachtete Ca-Konzentration oberhalb von ca. 92 km wird von nicht vollständig aus dem Datensatz entfernten, schwachen sporadischen Schichten verursacht. Dies erklärt auch die leichten Abweichungen in den Säulendichten, die in Tab. 4.4 gegenübergestellt werden. Wie erläutert konnte eine über die sich deckenden Unterkanten hinausgehende Übereinstimmung der Ca⁺-Ionenprofile nicht erwartet werden. Trotzdem ergeben sich im Modell eine Ca⁺-Säulendichte und Maximalkonzentration, die im Bereich der jährlichen Schwankungen der beobachteten Ca⁺-Schicht liegen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Vernachlässigt man die auch im Jahresmittel noch sichtbaren Maxima durch sporadische Schichten, folgt das modellierte Ca⁺-Profil recht gut dem Verlauf der gemessenen Ca⁺-Schicht. Da sporadische Schichten auf dreidimensionale Transportprozesse zurückzuführen sind (vgl. Kap. 5), widerspricht die in sporadischen Schichten *beobachtete* Ca⁺-Konzentration (Abb. 4.6) auch nicht der im eindimensionalen Modell erhaltenen Summe aller Ca-Spezies (ΣCa in Abb. 4.5).

Tab. 4.4: Vergleich von Säulendichten, Maximalkonzentrationen und Halbwertsbreiten zwischen Ca-Modell und Beobachtungen

	Ca (Modell)	Ca (Lidar)	Ca ⁺ (Modell)	Ca ⁺ (Lidar)
Säulendichte [cm ⁻²] ^{a)}	$1,7 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^7$
Maximalkonzentration [cm ⁻³]	24	22	27,1	29
Höhe des Maximums [km]	88,5	89,1	92,5	91,9
Halbwertsbreite [km]	5,9	7,7	8,6	5,4

^{a)} Säulendichte bis 100 km (Ca) bzw. 110 km (Ca⁺)

Für die Säulendichten von modellierter und beobachteter Ca-Schicht ergeben sich jedoch einige Unterschiede. Der Dichterückgang von Januar bis März und der Anstieg ab September werden zwar im groben wiedergegeben, das beobachtete Dichtemaximum im Sommer steht jedoch einem modellierten Minimum der Säulendichte gegenüber (Abb. 4.7). Das Minimum der Säulendichte im Modell liegt in der negativen Temperaturabhängigkeit verschiedener Reaktionen begründet, die jeweils zu einem Abbau der Ca-Atome führen (vgl. Abb. 4.4). So gilt für die Reaktion von Ca zu CaO noch $dk/dT > 0$, das CaO wird jedoch im Sommer unterhalb von 90 km aufgrund der geringen Temperaturen im Bereich der Metallschichten [She und von Zahn, 1998] verstärkt zu CaCO_3 und Ca(OH)_2 abgebaut. Im chemischen Gleichgewicht

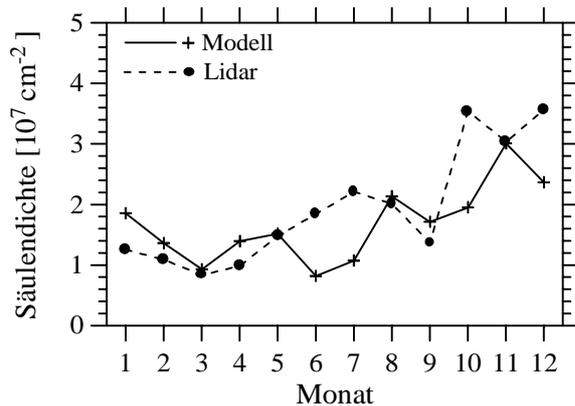


Abb. 4.7: Monatsmittelwerte der beobachteten Ca-Säulendichte im Vergleich mit den Monatswerten des Ca-Modells

sorgt dieser CaO-Abbau auch für eine Reduktion des atomaren Calciums. Die negativ temperaturabhängigen Reaktionen unter den ionisierten Molekülen können diesen Effekt nicht ausgleichen. Die Reaktionen R2, R4, R8, R9 und R11 von CaO sind jeweils im Labor gemessen worden [Plane und Nien, 1990; J.M.C. Plane, persönliche Mitteilung] und darum nicht innerhalb des Modells anzupassen. Im folgenden Abschnitt werden darum andere Ursachen der beobachteten hohen sommerlichen Ca-Dichte untersucht.

4.3.2 Zusätzliche Anpassungen des Modells

Die bisherige Darstellung des Ca-Modells entspricht in vielen Teilen den Metallmodellen, die seit Plane [1991] in verschiedenen Veröffentlichungen über Na, K und Fe behandelt wurden [Plane et al., 1998 und 1999; Helmer et al., 1998; Eska et al., 1999]. Im vorliegenden Modell berücksichtigen verschiedene Annahmen über die Quelle des atmosphärischen Calciums die Erkenntnisse aus der Beobachtung von Meteoroiden-Ablagerungsspuren, die in Kap. 6 vorgestellt werden. Die gegenüber den genannten Modellen stärkere Kopplung der Quellstärke an Meteorschauer bedingt einen geringeren Ca-Eintrag im Juni und Juli, in der Meteorschauer gar nicht oder nur in geringer Stärke beobachtet werden. Da im Sommer auch die Ca-abbauenden Reaktionen besonders schnell ablaufen, kann das in den Lidar-Daten beobachtete leichte Ca-Maximum nicht erklärt werden. Wurden bei experimentellen Modellvariationen die Ratenkoeffizienten einer Ca-Senke (z.B. die Reaktion zu Ca(OH)_2) verlangsamt, wurde dies aufgrund der Schnelligkeit der Reaktionen durch die zweite Senke (hier: CaCO_3) aufgefangen. Der üblicherweise in Metall-Modellen (z.B. Plane et al. [1999], Helmer et al. [1998], Eska et al. [1999]) verwendete Jahrgang sporadischer Meteoroiden [Hughes, 1978] zeigt ein Maximum im Herbst und mittleren Masseneintrag im Sommer und würde den Säulendichte-Jahrgang kaum verändern.

Zur Erhöhung der Ca-Konzentration im Sommer wurde eine zusätzliche Ca-Quelle im vorliegenden Modell implementiert, die hier qualitativ erläutert werden soll. *Hunten* [1980] beschreibt die Rekondensation verdampften kosmischen Staubes in der oberen Atmosphäre, bei dem die Temperatur des Partikels nur knapp zum Verdampfen der Metalle ausreicht und die Metall-Atome nur wenig kinetische Energie in die Dampfphase mitnehmen. Für hochschmelzende Metalle wie Calcium ist die Rekondensation damit wahrscheinlicher als für niedrigschmelzende wie Natrium. Bei Experimenten in Flammen wurde lt. *Schofield* [1992] die Rekondensation von Calcium beobachtet, nicht dagegen die von Alkalimetallen. Der gleiche Autor nennt Ca-Ca-Bindungsenergien in Ca-Clustern, die mit 13 kJ/mol deutlich geringer sind als die Werte für Natrium (53 kJ/mol) oder Kalium (71 kJ/mol) [*Schofield*, 1992]. Diese Energie kann z.B. durch Stöße mit Ionen oder freien Elektronen übertragen werden oder durch die Absorption solarer Strahlung, wobei im letzten Fall die übrigen Atome des Verbundes überschüssige Energie und Impuls aufnehmen müßten. Dazu passend gibt die im Sommer ansteigende Zahl von sporadischen Elektronenschichten [*Sprenger*, 1981; *Whitehead*, 1989] Hinweise auf eine größere Gesamtmenge von Ladungsträgern zwischen 85 und 110 km Höhe. In

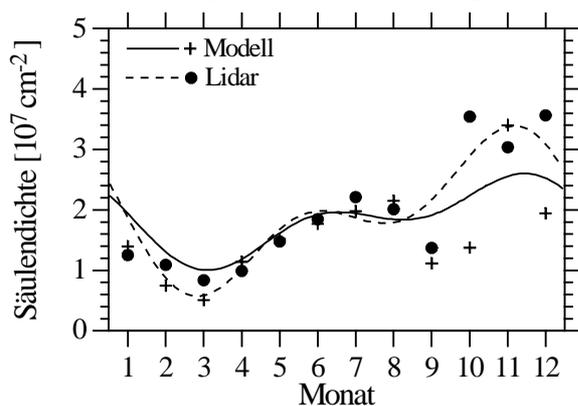


Abb. 4.8: Säulendichteverlauf mit zusätzlicher Metallquelle im Modell-Sommer. Die Punkte zeigen die Monatsmittelwerte, die Linien einen *Least-Square-Fit* mit jährlicher und halbjährlicher Variation

Abb. 4.8 ist der Jahresgang der Ca-Säulendichte dargestellt, nachdem die monatlichen Gewichtungsfaktoren für die Ca-Quelle so verändert wurden, daß die Juni- und Juli-Werte ca. 30 % über dem Mai-/August-Niveau lagen (vgl. Abb. 4.1). Die Linie zeigt jeweils einen *Least-Square-Fit* für jährliche und halbjährliche Variation. Eine Anpassung der Ratenkoeffizienten erfolgte nicht, da der mittlere Masseneintrag erhalten blieb. Die modellierte Säulendichte zeigt jetzt eine sehr viel bessere Übereinstimmung mit den beobachteten Werten.

4.4 Diskussion des Modells

4.4.1 Beschreibung der Lidar-Beobachtungen durch das Ca-Modell

Mit dem vorliegenden zeitunabhängigen, eindimensionalen Ca-Modell wurde erstmals versucht, die über zwei Jahre beobachtete Atomschicht eines Erdalkalimetalls abzubilden. Wie gezeigt wurde, gibt das Modell die mittlere Profilform der Ca-Schicht in Höhe und Dichte sehr gut wieder. Die Beschreibung der Unterkante der Ca^+ -Ionenschicht durch das Modell gelang ebenfalls sehr gut. Ohne weitere Anpassungen wurde sogar die gesamte Ca^+ -Schicht gut abgebildet, wobei die sporadischen Schichten in einem zeitunabhängigen 1-d-Modell naturgemäß außen vor bleiben müssen (siehe Kap. 5). Eine Signifikanzstudie zeigte die für die Form und

Lage der Schicht wichtigen Reaktionen der Ca-Chemie. Hier nicht dargestellt ist eine gute Übereinstimmung in der Temperaturabhängigkeit der Ca-Dichten zwischen Modell und Datensatz.

Mit dem Ca-Modell wird die in den Beobachtungen im Vergleich zu anderen Metallen gefundene größere Ionendichte [Kopp, 1997; Plane et al., 1999; Helmer et al., 1998] sehr gut erklärt. Die Raten für den Ladungsaustausch der Atome mit NO^+ oder O_2^+ (R17/R18) sind bei Ca gegenüber Na und Fe erhöht, die Raten für dissoziative Rekombination von Ca.X^+ oder CaO^+ mit Elektronen zu Ca (R23/R24) jedoch geringer als bei den übrigen Metallen. Diese verstärkte Ionen-Produktion wird nur zum Teil durch die Bildung stabiler CaO^+ -Moleküle aufgefangen (vgl. Abb. 4.5).

Die Modellchemie verursacht jedoch auch verschiedene Diskrepanzen zum beobachteten Datensatz. Auf das Problem der zu geringen Sommer-Dichte wurde bereits hingewiesen. Die Annahme einer weiteren Metallquelle erscheint plausibel, kann jedoch z.Zt. nicht näher experimentell untersucht werden. Die starke Ca-Senke im Modell-Sommer führt auch zu einem veränderten Jahresgang der Schichthöhe, die im Gegensatz zu den Beobachtungen zu größeren Höhen verschoben ist. In allen Monaten auftretende Schwankungen der beobachteten Schichthöhe führen zu einer größeren Schichtbreite gegenüber den idealisierten Modell-Profilen, die auch im Jahresmittel noch erkennbar ist.

In der Darstellung der Lidar-Beobachtungen wurde die gegenüber anderen Metallen größere zeitliche Variabilität der Ca-Schicht deutlich. Diese wird durch den verglichen mit anderen Metallen geringeren Anteil des ungeladenen Atoms an der Gesamtkonzentration des Metalls erklärt (vgl. Helmer and Plane [1998], Plane et al. [1998 und 1999], Eska et al. [1999]). In 85 km Höhe ist die CaCO_3 -Dichte zehnmal so groß wie die Ca-Dichte, d.h. eine Reaktion von 5 % der CaCO_3 -Moleküle zu Ca würde die Ca-Konzentration um 50 % erhöhen. Insgesamt beträgt der Anteil der Ca-Atome in dieser Höhe nur 6 % des gesamten Calciums, und selbst in Höhe des Ca-Maximums erreicht dieser Anteil nur weniger als 30 %. Ähnliche Betrachtungen lassen sich für das Verhältnis von Ca zu Ca^+ in ca. 100 km Höhe anstellen. Geringe Fluktuationen der Spurengase oder Temperaturänderungen wirken sich also auf die Ca-Schicht stärker aus als auf andere Metallschichten, wie auch Tab. 5.2 zeigt. Die geringere Abhängigkeit der Kalium-Dichte von Spurengaskonzentrationen [Eska, 1998] bestätigt diese Aussage.

Die Variabilität der Ca-Schicht erschwert andererseits die Beschreibung der Schicht durch ein auf Monatsmitteln beruhendes zeitunabhängiges Modell, ebenso die geringe Zahl von Nächten ohne sporadische Schichten zwischen September und Dezember, in denen eine „mittlere, ungestörte Schicht“ beobachtet werden konnte (vgl. Kap. 3). Obwohl die Zahl der im Labor untersuchten Ca-Reaktionen kleiner ist als bei anderen Metallen, sind die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen auch nicht größer als bei Modellen der Fe- oder Na-Schicht. Die folgenden Abschnitte diskutieren andere Metallmodelle.

4.4.2 Die verwendete Quelle der Metallschicht

In der monatlichen Gewichtung des Masseneintrags durch kosmischen Staub und die Höhenverteilung des verdampften Calciums wurde der hohe Siedepunkt von Ca im Vergleich zu anderen atmosphärischen Metallen berücksichtigt. Trotzdem mußte eine Verdampfungseffektivität von 1 % als skalierbarer Parameter eingefügt werden. Dieser Ansatz ist auch in anderen Metallmodellen üblich: *Helmer et al.* [1998] geben für Fe eine Effektivität von 67 % an, gehen aber auch nur von einem globalen Gesamteintrag von 21 Tonnen pro Tag aus. *Plane et al.* [1999] verwenden 38 % für ihr Na-Modell und *Eska et al.* [1999] 5 % für ihr K-Modell, jeweils wie auch im vorliegenden Modell bezogen auf einen globalen Eintrag von 110 Tonnen pro Tag und chondritischer Zusammensetzung. Der im vorliegenden Modell für Ca angenommene Faktor von 1 % wird in Kap. 6 zum Teil auf Unterschiede im Verdampfungsverhalten von Ca und leichter flüchtigen Metallen wie Fe oder Na zurückgeführt. Mit verschiedenen Annahmen ließe sich der derzeit nicht erklärbare Teil der Skalierung vermeiden:

- Neben CaCO_3 und Ca(OH)_2 bildet auch CaO^+ eine stabile chemische Ca-Senke, die sich im gleichen Höhenbereich wie die atomare Schicht befindet. Eine stärkere Ca-Quelle könnte durch eine Anreicherung von CaO^+ bei veränderten Ratenkoeffizienten die gleiche Ca-Schicht zur Folge haben. CaO^+ -Konzentrationen von mehreren hundert Ionen/ cm^{-3} würden jedoch in Sondierungen mit raketentragenen Ionen-Massenspektrometern durch sehr großen Konzentrationen des Ions 56^+ im Höhenbereich um 90 km Höhe auffallen. Die von 56^+ gemessenen Ionendichten wurden bisher aber ausnahmslos dem Ion Fe^+ zugeordnet [*Zbinden et al.*, 1975; *Kopp et al.*, 1985; *Kopp*, 1997; *Grebowsky et al.*, 1998]. Außerdem zeigen Experimente mit dem vorliegenden Ca-Modell, daß sich aufgrund der Dominanz der Ca^+ -Ionen oberhalb von 90 km Höhe jede Vergrößerung der Ca-Quelle in Ca^+ -Säulendichten niederschlägt, die um ungefähr den gleichen Faktor erhöht sind. Der Skalierungsfaktor von 0,01 bildet jedoch auch die Ca^+ -Schicht gut ab.
- Die Ablagerungsprofile für langsame kosmische Staubteilchen beruhen überwiegend auf Modellrechnungen. Falls jedoch Mikro-Meteoroiden das schwer-flüchtige Ca nicht im berechneten Umfang freisetzen, läge der tatsächliche Ca-Eintrag bei Beschränkung auf große und/oder schnelle Partikel mindestens um den gesuchten Faktor 15 geringer.

Im Abschnitt 4.3.2 wurde beschrieben, daß sich aus dem Ca-Modell die Forderung nach einer zusätzlichen sommerlichen Quelle für die Ca-Schicht ergibt. Der dort beschriebene Mechanismus wird als der wahrscheinlichste angenommen. Daneben sollen hier aber noch andere Quellen diskutiert werden: Aus simultanen Sondierungen von *Leuchtenden Nachtwolken* (*Noctilucent Cloud, NLC*) und hohen Ca-Konzentrationen wenige Kilometer oberhalb der NLC (vgl. Anhang B) ergeben sich Hinweise auf eine Korrelation von NLCs und hohen Ca-Dichten. Da NLCs meist mit sehr geringen Temperaturen verbunden sind, würde man eher eine geringe Ca-Dichte erwarten. NLCs stehen aber auch im Zusammenhang mit Bereichen hohen Ladungsträger-Konzentration, die von Radars indirekt detektiert werden. Diese Ladungsträger

bilden möglicherweise die Stoßpartner für die Dissoziation der Ca-Cluster. Ebenso denkbar sind heterogene, Ca-bildende Reaktionen auf der Oberfläche der NLC-Aerosole.

Verneint werden muß allerdings ein direkter Einfluß einer stark reduzierten H₂O-Konzentration durch Bildung von NLC-Eisteilchen, die für polare Breiten diskutiert wird [von Cossart *et al.*, 1999]. Falls überhaupt vorhanden verlangsamt eine Reduzierung der Wasserkonzentration zwar den Abbau der Ca-Schicht über CaO zu Ca(OH)₂ (vgl. Abb. 4.4), andererseits wird dann auch weniger Ca aus Ca(OH)₂ über CaOH zurückgebildet: Zum einen ist die Ca-Bildung aus Ca(OH)₂ schneller als aus CaCO₃, zum anderen wird der Abbau von CaCO₃ zu Ca(OH)₂ verlangsamt. Die Signifikanzanalyse in Tab. 4.2 bestätigt die positive Abhängigkeit der Ca-Dichte von der H₂O-Konzentration.

In diesem Zusammenhang muß auch die Frage diskutiert werden, inwieweit sich ein Gleichgewicht wie im Modell gefordert innerhalb der Nachtstunden überhaupt ausbilden kann. Die Ca-Atome und Ca⁺-Ionen besitzen Lebensdauern bezüglich der Ionenreaktionen R16 bis R18 und R23/R24 von mehreren Stunden, so daß insbesondere eine kurze Sommernacht zum Herstellen des Gleichgewichts nicht ausreicht. Die aus dem Modell erhaltenen Ratenkoeffizienten stellen somit in gewisser Weise einen Mittelwert aus Tag- und Nachtbedingungen dar. Hieraus läßt sich jedoch keine Lösung des „Sommer-Problems“ ableiten. Am Tage wird vermehrt Ca durch Photoionisation zu Ca⁺ abgebaut, in der Nacht bildet sich dann wieder verstärkt Ca durch reduzierte Photoionisation und weiterhin ablaufende dissoziative Rekombination von Molekül-Ionen. Die Geschwindigkeit der Photoionisations-Reaktion ist bei einem Ratenkoeffizienten von $k_{16, \text{Tag}} = 3 \cdot 10^{-5}$ [Swider, 1970] jedoch auch am Tage höchstens in der gleichen Größenordnung wie die in der Nacht deutlich überwiegenden Ladungsaustausch-Reaktionen (vgl. Tab. 4.1 und Rutherford *et al.* [1972]). Eine verstärkte Photoionisation im Sommer führt zusätzlich sowohl zu einer Verringerung der tatsächlichen Ca-Menge im Sommer, als auch zu einer Überschätzung der Ca-Menge im Modell-Sommer.

4.4.3 Metall-Jahresgänge und andere Modell-Parameter im Vergleich

Bisher berichteten nur McNeil *et al.* [1998] über die Modellierung der Ca-Schicht. Die Autoren mußten einen Anteil von 2 % schneller Meteoroiden ($v_g > 30$ km/s) ansetzen, um das in Raketensondierungen [Zbinden *et al.*, 1975] gemessene Na⁺/Ca⁺-Verhältnis von 3 zu erhalten. Die dabei modellierten Ca- und Ca⁺-Schichthöhen stimmen recht gut mit den Kühlungsborner Beobachtungsdaten überein (Ca-Maximum: 87,7 km zu 89,1 km, Ca⁺-Maximum: 94 km zu 91,9 km). Die Ca- und Ca⁺-Dichten sind jedoch im Modell ca. dreimal bis viermal größer als in unseren Beobachtungen.

Eine größere Zahl von Modellen wurde zu Natrium veröffentlicht, da für dieses Metall sowohl mehr Beobachtungsmaterial als auch mehr Labordaten vorliegen. Neben einem zeitabhängigen Modell zur Entstehung sporadischer Na-Schichten [Cox und Plane, 1998] sind in jüngerer Zeit zeitunabhängige 1-d-Modelle für hohe und mittlere geographische Breiten erschienen [McNeil *et al.*, 1995; Plane *et al.*, 1998 und 1999]. Die Abbildung der Säulendichte eines 3-jährigen Datensatzes aus Urbana-Champaign, Illinois (40°N) und Fort Collins, Colo-

rado (41°N) gelingt im Modell von *Plane et al.* [1999] sehr gut. Der Jahresgang zeigt eine vor allem jährliche Variation mit einem Dichteminimum im Sommer. Die Schichthöhe im Sommer wird jedoch vergleichbar dem vorliegenden Ca-Modell um 2,5 km zu hoch wiedergegeben. In der Schichtbreite unterschätzt das Modell die beobachteten Daten und zeigt eine leicht veränderte Variation. Der integrierte Masseneintrag wird im Modell willkürlich festgelegt und ist damit ebenfalls als skalierbarer Parameter anzusehen.

Das etwas ältere Modell von *McNeil et al.* [1995] beruht genauso wie *Plane et al.* [1998 und 1999] weitgehend auf Ratenkoeffizienten, die bereits in *Plane und Helmer* [1994] veröffentlicht worden sind. Auch hier bestimmen vor allem Temperaturvariationen den Jahresgang, was wiederum zu einem Dichteminimum in einer zu größeren Höhen verschobenen Schicht im Sommer führt.

Auch zu Eisen wurde in jüngerer Zeit ein 1-d-Modell veröffentlicht [*Helmer et al.*, 1998], das die Säulendichteviation in mittleren Breiten mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer gut wiedergibt. Weitere Schichtparameter werden nicht explizit verglichen, jedoch ergibt sich aus den Profilen der einzelnen Monate wiederum eine im Modell im Sommer etwas zu hohe Schicht. Die Diskrepanzen zwischen Modell und Beobachtung sind anscheinend für alle Metalle qualitativ gleich vorhanden. Die auch beim Fe-Modell von *Helmer et al.* [1998] im Mittel zu geringe Schichtbreite kann wiederum auf die größere Streuung der beobachteten Profile zurückgeführt werden.

Ein breitenabhängiges 1-d-Modell der Kalium-Schicht wurde von *Eska et al.* [1999] veröffentlicht, das im Prinzip auf den gleichen Algorithmen beruht wie die zitierten Modelle zu Na und Fe. Die Algorithmen der Na-Modelle wurden wiederum für das vorliegende Ca-Modell übernommen. Mit dem K-Modell [*Eska et al.*, 1999] ergibt sich für die Nordhalbkugel eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung, während auf der Südhalbkugel meist größere Säulendichten und Schichtbreiten gemessen wurden. Zum Teil sind diese Diskrepanzen auf in den Daten enthaltene sporadische Schichten zurückzuführen. Für mittlere Breiten modelliert *Eska* [1998] die Kalium-Schicht am Beispiel der Monate Januar und Juli in weitgehender Übereinstimmung mit den Meßdaten. Da nur für zwei Monate Modell-Profile vorliegenden, ist ein Vergleich mit dem auch in den Kühlungsborner K-Sondierungen beobachteten Sommermaximum [*Eska et al.*, 1998] jedoch nicht möglich.

Während die Unterschiede in den Profilformen der verschiedenen Metalle durch die Chemie-Modelle sehr gut wiedergegeben werden (Abschnitt 4.4.1), scheinen für die Unterschiede im Jahresgang auch nicht-chemische Ursachen vorzuliegen. Bei weitgehend ähnlicher jahreszeitlicher Variation der Quellstärke ergeben die Rechnungen für alle Metalle ein sommerliches Dichteminimum, das vor allem vom Jahresgang der Temperatur in der Metallschicht bestimmt ist [*McNeil et al.*, 1995]. Für Na und Fe entspricht dies den Beobachtungen, nicht aber bei Ca. Durchgehend geben die Modelle im Sommer eine zu hohe Metallschicht an. *Plane et al.* [1999] begründen diese Differenz mit dem aus dem Modell von *Garcia und Solomon* [1983, 1985] übernommenen Eddy-Diffusionsprofil, das auch im vorliegenden Modell verwendet wurde. Zur Reduzierung dieses Fehlers wurde der Jahresgang der Eddy-Diffusion im vor-

liegenden Ca-Modell quantitativ an andere Modell-Profile der Eddy-Diffusion angepaßt. Da die Eddy-Diffusion auf alle Metalle gleichermaßen wirkt, kann sie jedoch nicht zur Erklärung der unterschiedlichen Jahrgänge herangezogen werden.

In den Modellen von *Helmer et al.* [1998] und *Plane et al.* [1999] werden trotz einer asymmetrisch zu den Solstitien verlaufenden Gewichtungsfunktion des Einfalls kosmischen Staubes die Na- und Fe-Schichten korrekt symmetrisch abgebildet. Die Ca-Schicht zeigt jedoch keine Symmetrie, andererseits ist bedingt durch den geringeren Anteil der Ca-Atome am Gesamt-Ca der Einfluß der Gewichtungsfunktion auf die Säulendichte größer (vgl. Abb. 4.1 und 4.7). Dies bestätigt noch einmal die Notwendigkeit der Annahme einer zusätzlichen Ca-Quelle zur Beschreibung des bei Na und Fe nicht beobachteten Sommer-Maximums (Abschnitt 4.3.2).

5 Beobachtungen und Analysen sporadischer Metallschichten

Im Kap. 3 wurden an verschiedenen Stellen bereits sog. *sporadische Schichten* erwähnt, d.h. Bereiche schnell veränderlicher, erhöhter Metaldichte. In diesem Kapitel sollen sporadische Schichten an Beispielen beschrieben und untersucht werden. Sie werden bei allen Metallen in der Mesopausenregion mehr oder weniger häufig aufgezeichnet. Bereits in den ganz frühen Berichten über Na-Lidar-Sondierungen zeigen *Bowman et al.* [1969] ein „irreguläres“ Profil einer Na-Schicht. Deutlich zu erkennen ist eine „irreguläre“ Na-Schicht in den Messungen von *Gibson und Sandford* [1971], die oberhalb der normalen Na-Schicht ein weiteres lokales Maximum beobachteten. Weitere 6 Jahre später beobachteten *Clemesha et al.* [1978] über Sao José dos Campos (Brasilien, 23°S, 46°W) mit einem Na-Lidar oberhalb der permanenten, ungestörten Na-Schicht eine weitere Na-Schicht mit der ungewöhnlich geringen Halbwertsbreite von ca. 2,5 km.

Den „irregulären“ Schichten wird weitere 10 Jahre kaum Beachtung geschenkt, bis 1987/88 eine Reihe von Sondierungen über dem nord-norwegischen Standort Andenes (Andøya, 69°N, 16°O) veröffentlicht wird, die sog. „plötzliche Na-Schichten“ beschreiben [*von Zahn et al.*, 1987 und 1988; *von Zahn und Hansen*, 1988]. Den Veröffentlichungen von von Zahn und Mitarbeitern folgten dann in rascher Folge solche von Beobachtungen der nunmehr „sporadische Na-Schichten“ genannte Phänomene in hohen, mittleren und niedrigen geographischen Breiten [*Gardner et al.*, 1988; *Beatty et al.*, 1988; *Kwon et al.*, 1988]. Insgesamt erschienen bis 1994 rund 40 Veröffentlichungen zum diesem Thema, die von *Clemesha* [1995] in einem Übersichtsartikel zusammengefaßt wurden. In den verschiedenen Veröffentlichungen wird deutlich, daß bis heute keine einheitliche Erklärung für die Entstehung sporadischer Metallschichten, ihre Häufigkeit, geographische Verteilung und variable Gestalt gefunden wurde.

Unstrittig ist jedoch die enge Verflechtung von atomaren und ionisierten sporadischen Metallschichten [*Alpers et al.*, 1993; *Qian et al.*, 1998]. Am Standort Kühlungsborn konnten im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel von Ca und Ca⁺ beide Arten gleichzeitig untersucht werden. Aus der simultanen Sondierung von Atomen und Ionen in sporadischen Schichten können außerdem Informationen über Eigenschaften mit kurzen Zeitkonstanten erhalten werden, da sich hier im Gegensatz zu permanenten Schichten noch kein chemisches Gleichgewicht eingestellt hat.

5.1 Beispiele sporadischer Ca- und Ca⁺-Schichten

In diesem Abschnitt wird zunächst eine Definition für sporadische Ca-Schichten gegeben. Anschließend werden an Fallstudien aus drei verschiedenen Nächten die Variabilität, aber auch gemeinsame Eigenschaften sporadischer Schichten herausgearbeitet.

5.1.1 Definition sporadischer Metallschichten

Als sporadische Metallschichten bezeichnet man gelegentlich („sporadisch“) auftretende Bereiche erhöhter Metallkonzentration, die meist eine Dicke von nur wenigen km haben. Die Metallkonzentration steigt dabei innerhalb weniger Minuten in einer bestimmten Höhe stark an. Nach mehreren Minuten bis zu mehreren Stunden geht die Dichte dann meist auch wieder sehr schnell auf das normale Maß zurück. Innerhalb dieser Zeit mißt man z.T. starke Schwankungen der Konzentration und der Höhe der Schicht. *Hansen und von Zahn* [1990] und *Alpers et al.* [1994] grenzen sporadische Schichten von Natrium- und Eisen-Atomen quantitativ von anderen Dichteveränderungen ab: Der Dichteanstieg beträgt mindestens 15% pro Minute (Na) bzw. 5% pro Minute (Fe), die Halbwertsbreite der Schicht liegt jeweils unter 5 km. In dieser Arbeit wird für Calcium die gleiche Definition wie in *Alpers et al.* [1994] für Eisen benutzt. Viele sporadische Ca-Schichten waren jedoch schon bei Meßbeginn sichtbar, so daß tatsächlich meist nur die Halbwertsbreite als Auswahlkriterium angewendet werden konnte.

Für sporadische Ionen-Schichten gilt die gleiche Definition wie für neutrale sporadische Schichten. In den meisten Lidar- und in-situ-Sondierungen werden Calcium-Ionen vor allem in Form von sporadischen Schichten dokumentiert [*Granier et al.*, 1989; *Gardner et al.*, 1993; *Alpers et al.*, 1996; *Grebowsky et al.*, 1998].

Stationäre Lidars wie das hier beschriebene Kühlungsborner Metall-Doppellidar benutzen meist ein festes Beobachtungsvolumen. Bei der Entstehung und zeitlichen Variation von sporadischen Schichten kann man also nicht unterscheiden, ob diese Veränderung chemische Ursachen (lokale Produktion und Abbau von Metall-Atomen) oder dynamische Ursachen (Drift einer bestehenden Schicht durch das Lidarsichtfeld) haben. Messungen mit flugzeuggetragenen Lidars ergaben horizontale Ausdehnungen einiger sporadischer Schichten bis zu zweitausend Kilometern [*Kane et al.*, 1991]. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Beispiele für sporadische Ca- und Ca⁺-Schichten gegeben. Der Index „S“ soll auch weiterhin sporadische Schichten bezeichnen (Ca_S / Ca⁺_S).

5.1.2 Beobachtungen am 3./4. November 1997

Zu Beginn der Nacht 3./4. November 1997 wurde eine sporadische Ca⁺-Ionenschicht bei 93 km sowie ab 19:30 UT eine weitere, schwache Ca⁺_S bei 110 km beobachtet, die kurz darauf bis 105 km und weiter bis auf 103 km absank (Abb. 5.1). Etwa ab 21:30 UT bildete sich ein weiteres lokales Ca⁺-Maximum unterhalb von 100 km, das bald darauf zu einer breiten Schicht anwuchs. In den Profilen neutralen Calciums erkennt man zu Beginn eine Ca_S bei 93 km auf einer permanenten Schicht oberhalb von 82 km. Zeitgleich mit der ionisierten Schicht in dieser Höhe verbreiterte sich die neutrale Ca_S vor allem an der Oberkante und spaltete sich anschließend in zwei separate Schichten auf. Im weiteren Verlauf konnte man bei beiden Spezies mehrere getrennte lokale Maxima beobachten. Während des gesamten Beobachtungszeitraums bildete sich oberhalb von 100 km keine neutrale sporadische Calcium-Schicht aus. Nur gegen 21:40 UT wurde bei knapp 107 km eine geringe Konzentration neutralen Cal-

ciums beobachtet. Zu diesem Zeitpunkt erreichte die Ionen-Konzentration in der oberen Ca^+_s mit ca. 300 cm^{-3} ihr Maximum.

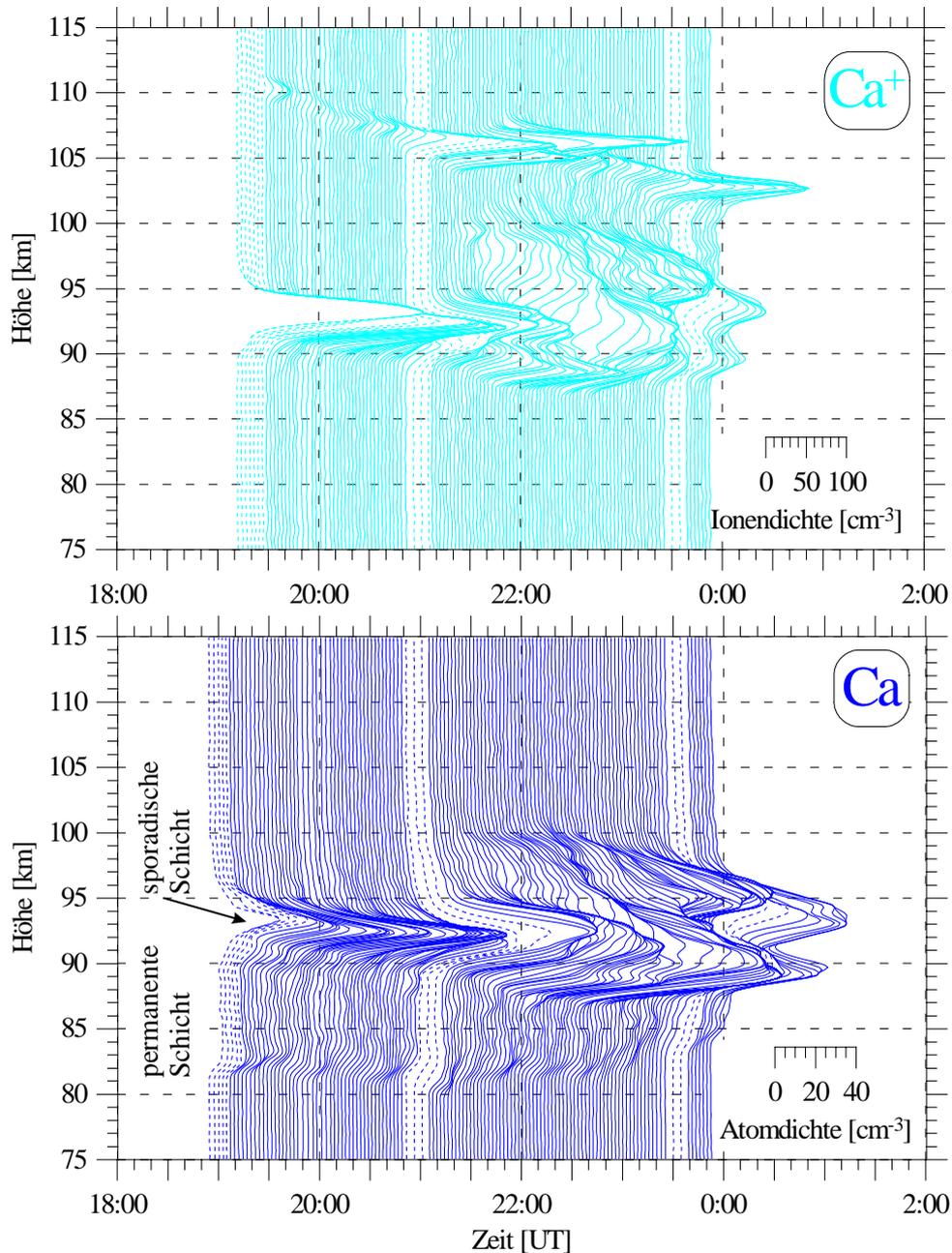


Abb. 5.1: Seriendarstellung der Dichteprofile von Ca und Ca^+ vom 3./4. November 1997. Jede Kurve repräsentiert ein Dichteprofil nach ca. 2 min Integrationszeit. Die Auslenkung beschreibt die beobachtete Metall-Dichte in Atome/cm^3 , die Null-Linie wird durch die Uhrzeit der Datenaufnahme festgelegt. Jedes Profil ist mit einem laufenden Hanning-Filter über 1,8 km mit 200 m Schrittweite geglättet [Press et al., 1992] sowie zeitlich über drei Profile mit einer Schrittweite von einem Profil gemittelt. Während der Aufnahme der gestrichelten Profile waren die Laser noch nicht genau auf die Resonanzwellenlängen von Ca^+ bzw. Ca abgestimmt.

Die in dieser Nacht beobachteten Veränderungen der Ca- und Ca⁺-Schicht geben, wie im Abschnitt 5.1.1 beschrieben, nicht allein den Zeitverlauf der chemischen Veränderungen in der Metallschicht wieder, sondern eine Überlagerung aus chemischen Reaktionen zum Meßzeitpunkt und horizontalem Transport verschiedener „Luftpakete“ ins Lidarsichtfeld. Zur Erklärung der Beobachtungen muß man also chemische *und* dynamische Effekte heranziehen.

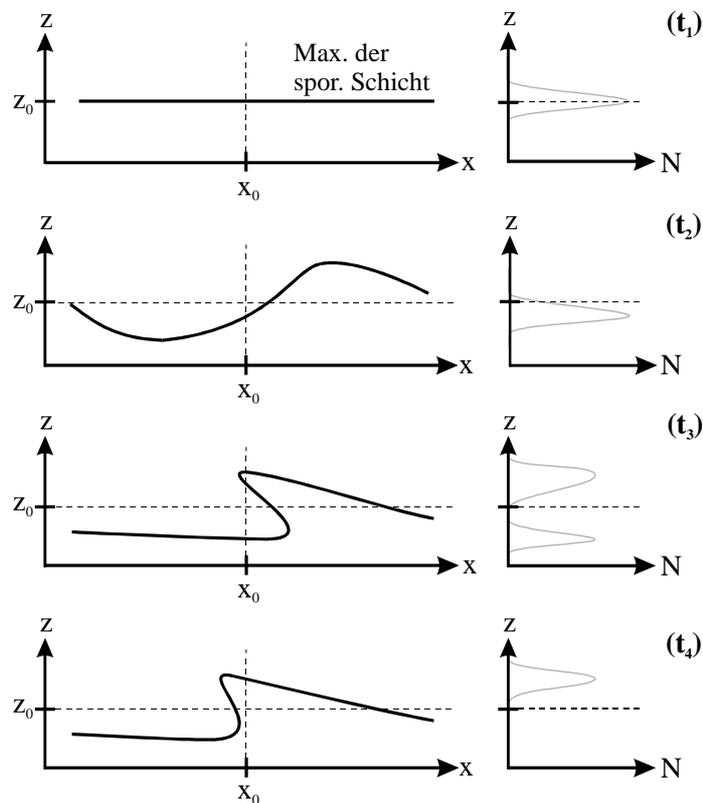


Abb. 5.2: Schematische Darstellung zur Entstehung und Beobachtung gefalteter sporadischer Schichten nach Höffner [1994] und Höffner und von Zahn [1994]. Aus einer in x -Richtung ausgedehnten stratiformen Schicht in der Höhe z_0 (Zeitpunkt t_1) entsteht bei bestimmten Anordnungen von E -, B - und Windfeld eine gefaltete Schicht (t_2 bis t_4). Links ist jeweils die Höhe des Schichtmaximums dargestellt, rechts das Metallprofil, daß ein Beobachter an der Position x_0 messen würde.

Das zeitabhängige, dreidimensionale Dynamik-Modell von Höffner [1994] beschreibt die Lage von neutralen und ionisierten Eisen-Schichten unter Einfluß elektromagnetischer Felder und atmosphärischer Schwerewellen (Abb. 5.2). Die Ergebnisse dieses Modells lassen sich zumindest qualitativ auf Calcium-Schichten übertragen. Danach kann sich eine glatte, in konstanter Höhe ausgedehnte (stratiforme) Schicht bei bestimmter Lage von E - und B -Feld und bestimmter Phase der Welle zu einer gefalteten Schicht verformen. Danach beobachtet ein stationäres Lidar während des Auffaltungs- und Entfaltungsprozesses zunächst den unteren Teil der gefalteten Schicht (Zeitpunkt t_2), anschließend die Faltung selbst (t_3) und am Ende während der Entfaltung den oberen Teil der Schicht (t_4). Dies entspricht den Beobachtungen vom 3./4. November 1997 unterhalb von 100 km Höhe. Wenige Kilometer entfernt von dieser Auffaltungszone

würde man aufgrund der veränderten Phasenlage nur noch eine wellenförmige Bewegung der Höhe des Schichtmaximums beobachten, nicht aber eine Doppelschicht. Die Beobachtungsdaten zeigen oberhalb von 100 km eine weitere sporadische Ionenschicht, die durch ein elektrisches Feld abwärts bewegt wird. Außerdem ist eine überlagerte Wellenbewegung erkennbar, die aber aufgrund der vertikal verschobenen Phase nicht zu der Ausbildung einer Doppelschicht führt. Aufgrund der sehr geringen Rekombination von Ionen in neutrales Calcium oberhalb von 100 km wird hier keine Ca_s beobachtet.

5.1.3 Beobachtungen am 7./8. April 1997

In der Nacht 7./8. April 1997 waren schon beim Einschalten des Lidars gegen 19:30 UT (Ca) bzw. 19:40 UT (Ca^+) sporadische Schichten von neutralem und ionisiertem Calcium um 95 km Höhe herum sichtbar. Eine weitere schwache sporadische Ionenschicht bildete sich im Verlauf der Nacht in ca. 102 km Höhe und korrelierte nicht mit einer neutralen Schicht. Die neutrale Ca_S saß auf einer bei ca. 84 km Höhe beginnenden, schwachen permanenten Schicht. Abb. 5.3 gibt einen Überblick über das zeitliche Verhalten der sporadischen und permanenten Schichten im Verlauf der Nacht. Insgesamt dauerte die Sondierung von 19:30 UT bis 22:50 UT mit einer Unterbrechung wegen Wolken von 21:00 UT bis 21:50 UT.

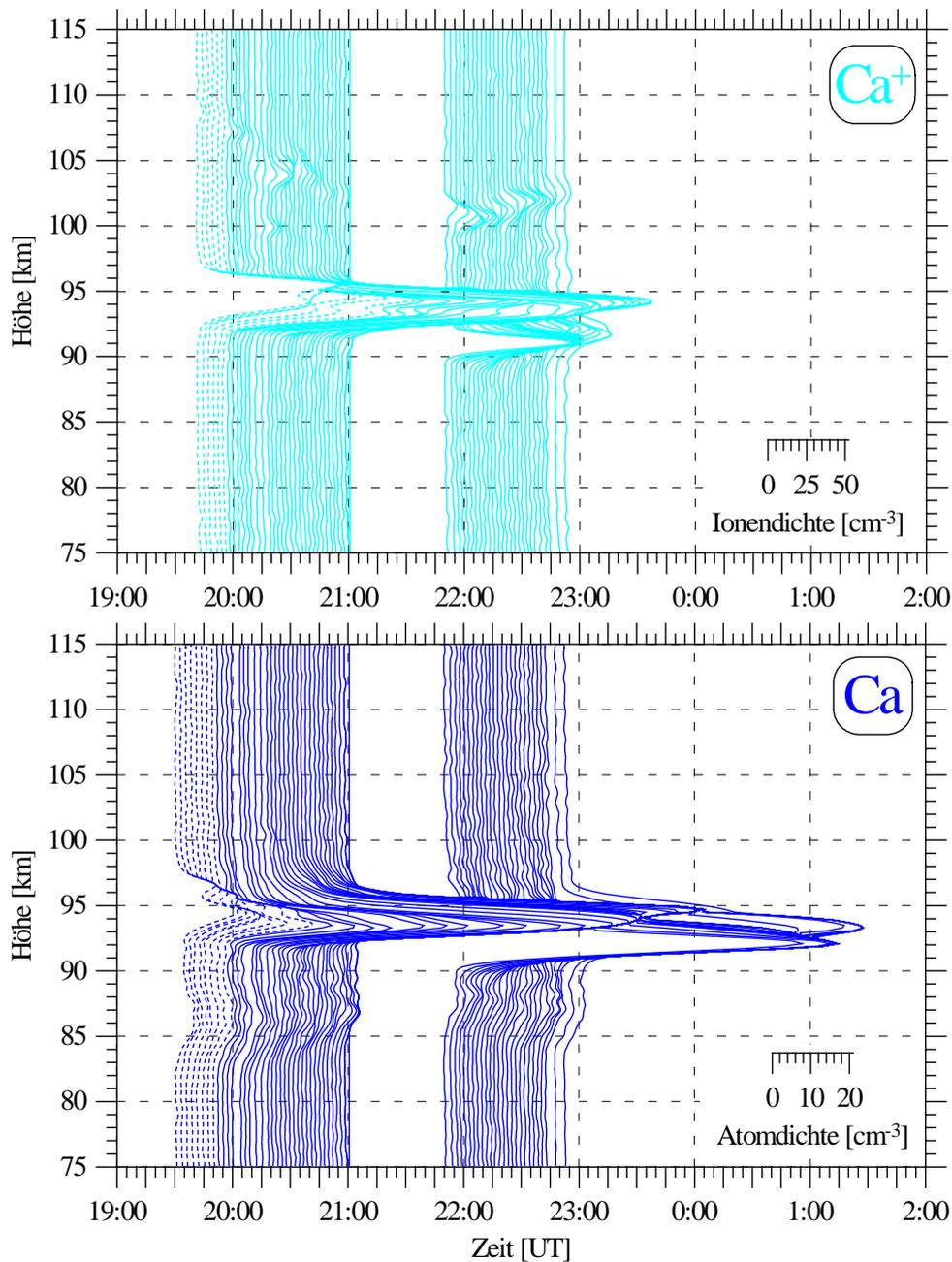


Abb. 5.3: Seriendarstellung der Dichteprofile von Ca und Ca^+ vom 7./8. April 1997. Glättung und Darstellung erfolgten wie in Abb. 5.1.

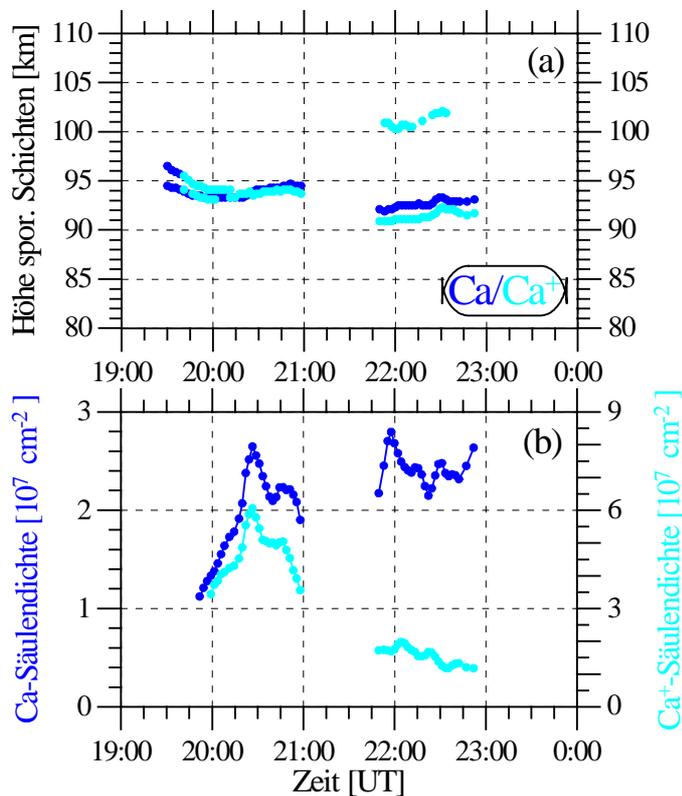


Abb. 5.4: a) Höhe sporadischer Schichten und b) Säulendichte von Ca und Ca^+ für die Nacht 7./8. April 1997. In der Figur b) beginnt die Darstellung erst nach der Absolutkalibrierung der Laser, während der nur Profile ohne absolute Dichte-Informationen aufgenommen werden konnten.

Die unabhängige Bewegung von Ionen und Neutralteilchen setzt sich nach der Meßunterbrechung mit einer Höhendifferenz von 2 km fort. Winde bewirken eine Bewegung der gesamten Atmosphäre, verschieben die neutrale und ionisierte Schicht also nahezu synchron, wie z.B. gegen 22:30 UT zu sehen ist. Ionen erfahren zusätzlich elektrische Feldkräfte und durch die Wind-Bewegung der Ionen durch ein elektromagnetisches Feld erzeugte *Lorentz-Kräfte*. Die Bewegung wird durch die höhenabhängige Reibung mit den Teilchen der Neutralatmosphäre beeinflusst.

Aufgrund des großen Anteils der sporadischen Ca-Schicht an der Ca-Gesamtsäule, ist der Säulendichteverlauf der gesamten Schicht (Abb. 5.4 b) ein gutes Maß für die Änderungen der Ca_s . Man erkennt, daß die Dichteänderungen von Ca_s und Ca^+_s im ersten Teil der Nacht im groben ähnlich verlaufen. Eine genauere Betrachtung zeigt aber geringe Phasendifferenzen: Vor der Wolkenpause ist die Phasenlage der Säulendichteänderungen noch identisch. Nach der 50-minütigen Unterbrechung ergibt sich eine Phasendifferenz der Säulendichten $\varphi_s(\text{Ca}_s) - \varphi_s(\text{Ca}^+_s)$ von rund 10 Minuten.

Die teilweise unabhängigen Bewegungen und Dichteänderungsphasen der beiden Spezies deuten auf das Fehlen einer direkten, schnellen chemischen Umwandlung von Ionen in atomares Calcium hin. Dieses Bild wird bei Betrachtung der Quotienten von Ca^+ - und Ca-Dichte bestätigt, der in Abb. 5.5 für jeden Zeitpunkt und jede Höhe gebildet wurde. Die Höhe der neutralen sporadischen Schicht ist durch Kreuze gekennzeichnet. Man erkennt das große

In Abb. 5.4 sind die Höhen der lokalen Konzentrations-Maxima und die Säulendichte gegenübergestellt. Die sporadischen Schichten sind zunächst bei beiden Spezies zu zwei Maxima separiert, die jedoch im Verlauf der Nacht ineinander übergehen (Abb. 5.4 a). In Figur 5.3 erkennt man, daß die obere Spitze der sporadischen Ionenschicht die gesamte Ca^+_s dominiert. Dieses Maximum bewegt sich bis 21 UT ca. 2 km nach unten. Die neutrale sporadische Schicht im gleichen Höhenbereich bleibt dagegen in der Höhe relativ stabil, das schwache, lokale Ca-Maximum um 96 km verschwindet schnell in der Hauptschicht. Die unabhängige Bewegung von Ionen und Neutralteilchen setzt sich nach der Meßunterbrechung mit einer Höhendifferenz von 2 km fort. Winde bewirken eine Bewegung der gesamten Atmosphäre, verschieben die neutrale und ionisierte Schicht also nahezu syn-

Ca^+/Ca -Verhältnis in Höhe der ionisierten sporadischen Schicht. Innerhalb der rund eine Stunde dauernden Kreuzung von Ca_s^+ und Ca_s kann man keine signifikante Umwandlung von Ionen in Atome (oder umgekehrt) erkennen.

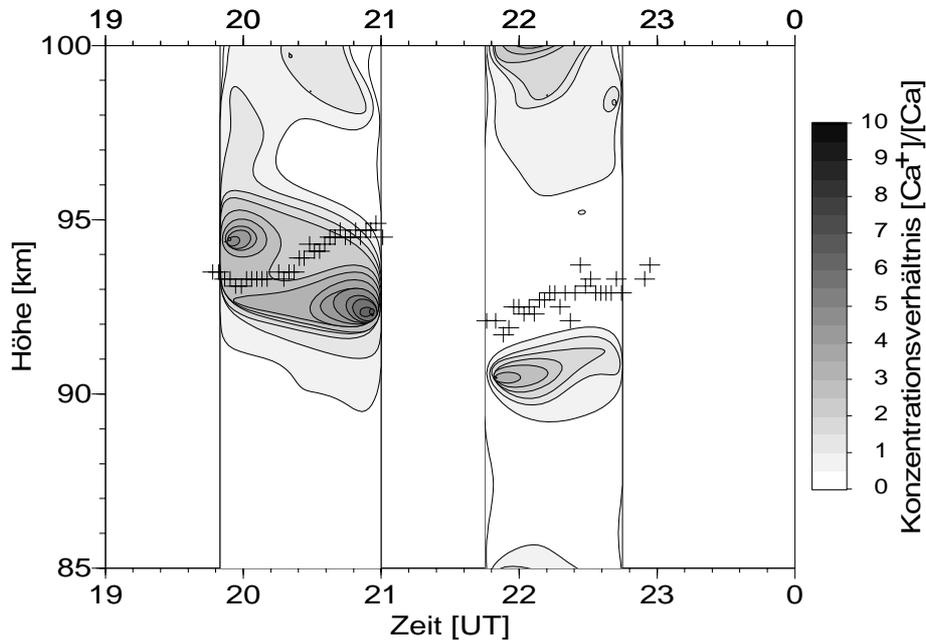


Abb. 5.5: Konzentrationsverhältnis von Ca^+ und Ca unterhalb von 100 km in der Nacht 7./8. April 1997. Die Darstellung ist über 1 km und 15 min geglättet. Die Kreuze geben die Höhe der Ca_s an.

5.1.4 Beobachtungen sporadischer und „hoher“ Schichten am 1./2. August 1997

Am 1./2. August 1997 wurden mehrere Schichten von atomarem und ionisiertem Calcium beobachtet (Abb. 5.6). Zu Beginn der Sondierung wurde eine sporadische Ca^+ -Schicht mit einer Konzentration von mehr als 500 Ionen/cm^3 in einer Höhe von 100–105 km detektiert. Diese Schicht teilte sich kurz nach 22:20 UT in eine Doppelschicht, deren Maxima bis zu ca. 3 km auseinanderliefen. Ab 23:30 UT wurde nur noch ein Maximum beobachtet. Das obere (und später einzige) Maximum bewegte sich synchron mit der *neutralen* sporadischen Schicht mit ca. 2,5 km/h abwärts. Die maximale Konzentration der Schicht schwankte insgesamt zwischen ca. 200 cm^{-3} und 660 cm^{-3} , z.T. mit einem Gradienten von (absolut) ca. $40 \text{ cm}^{-3} \text{ min}^{-1}$. Unterhalb der sporadischen Schicht wurde ebenfalls Ca^+ in Konzentrationen bis ca. 10 cm^{-3} detektiert.

In den Ca-Profilen erkennt man zu Beginn der Messung eine für den Sommer typische, schmale permanente Schicht zwischen 84 und 91 km, deren Unterkante im Verlauf der Sondierung wellenförmig bis auf 86 km Höhe ansteigt. Außerdem erkennt man eine zweite Schicht zwischen 108 und 120 km Höhe. Für eine sporadische Schicht ist ihre Halbwertsbreite mit ca. 6 km zu groß. Im Verlauf der Nacht nahm die Dichte in der Schicht zwar ab, das Rückstreusignal lag jedoch bis zuletzt signifikant oberhalb des Rauschniveaus (vgl. Profile oberhalb von

120 km). Derartige hohe und breite Schichten wurden in 112 Ca-Sondierungen insgesamt siebenmal beobachtet. Sie werden in den Abschnitten 5.2.2 und 5.4.3 weiter analysiert.

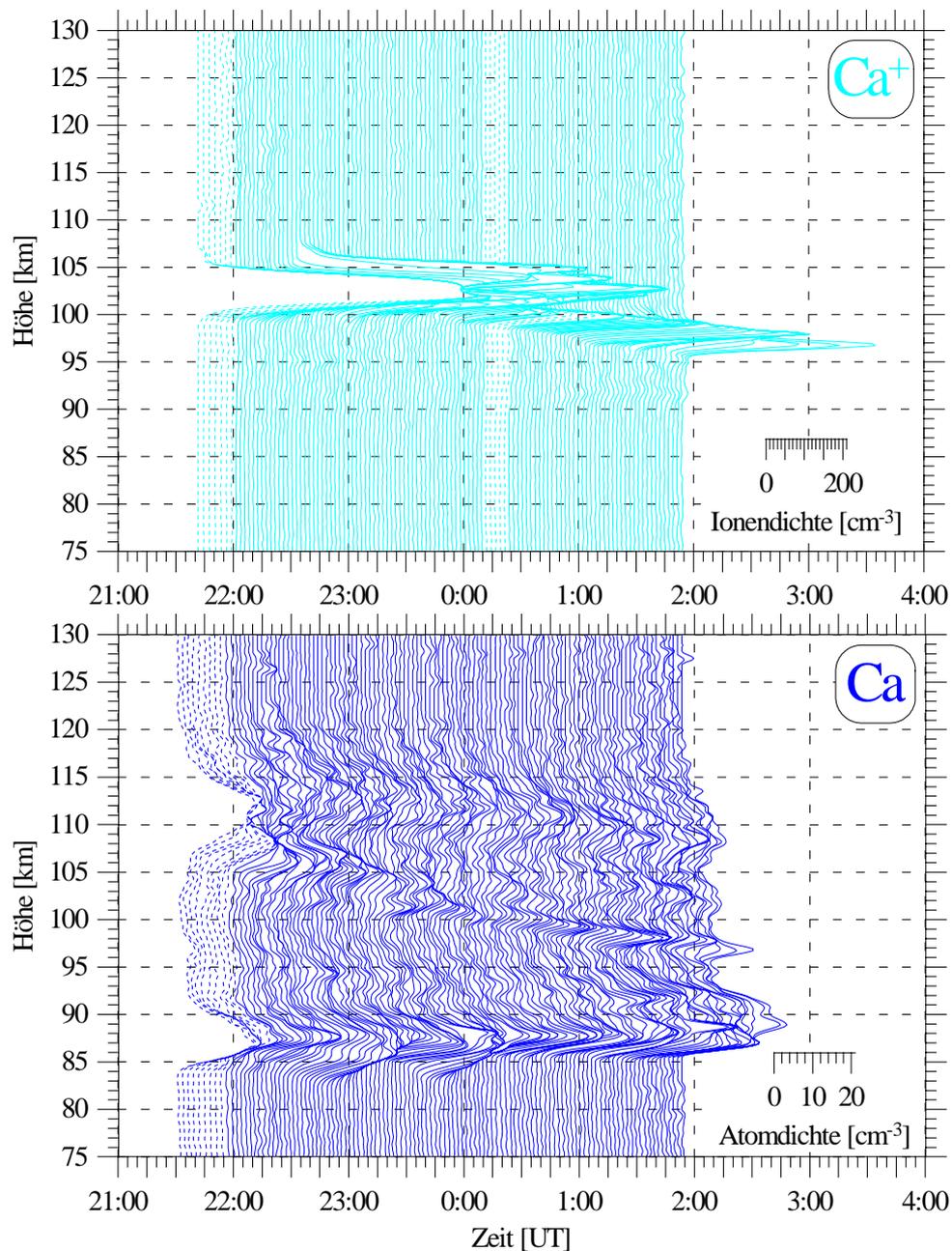


Abb. 5.6: Seriendarstellung der Dichteprofile von Ca und Ca⁺ vom 1./2. August 1997. Glättung und Darstellung erfolgten wie in Abb. 5.1.

Kurz nachdem gegen 21:55 UT die Wellenlängenkalibrierung des Ca-Lidars abgeschlossen war, bildete sich an der Unterseite der hohen Ca-Schicht eine sporadische Ca-Schicht. Diese sank im Verlauf der Sondierung mit durchschnittlich 2,5 km/h bis auf eine Höhe von 97 km (1:55 UT) ab. Der übrige Teil der hohen Ca-Schicht dehnte sich gleichzeitig vertikal weiter aus, ohne daß sich die Ca-Gesamtmenge innerhalb dieser Schicht wesentlich änderte. Die Ca⁺-Ionendichte lag in der gesamten Nacht im Höhenbereich der hohen neutralen Ca-Schicht und zu Beginn auch im Bereich der neutralen Ca_s unter einem Ion pro cm³.

5.2 Analyse sporadischer Ca- und Ca⁺-Schichten über Kühlungsborn

5.2.1 Die Höhenverteilung sporadischer Schichten

Im Abschnitt 5.1 wurden gemeinsame sporadische Ca- und Ca⁺-Schichten vorgestellt. Die beschriebenen Beispiele weisen aber auch auf Unterschiede zwischen neutralen und Ionenschichten insbesondere oberhalb von 100 km hin. Darum wird in diesem Abschnitt untersucht, wann sporadische Schichten gemeinsam oder nur in einer Spezies auftreten.

Dazu wurden alle sporadischen Schichten gemäß der Höhe mit der größten Konzentration in Kanäle von 5 km Breite einsortiert. Durchliefen absinkende sporadische Schichten mehrere dieser Höhenkanäle, so wurden sie dem Kanal zugeordnet, in dem sie am längsten beobachtet wurden. Insgesamt wurden 89 sporadische Ca-Schichten (in 112 Nächten) und 99 sporadische Ca⁺-Schichten (in 58 Nächten) registriert. Die Tab. 5.1 zeigt den so erhaltenen Datensatz. Bei der relativ großen Zahl von Einzelereignissen pro Höhenkanal stellt sich die Frage, warum nicht eine geringere Kanalbreite von z.B. 2,5 km gewählt wurde, um ein genaueres Bild von der Höhenverteilung zu erhalten. Dies erschien aus zwei Gründen nicht sinnvoll:

- Erstens wäre in diesem Fall die Kanalbreite gleich der typischen Breite einer sporadischen Schicht, die Einordnung einer am Rand eines Kanals beobachteten sporadischen Schicht in diesen Kanal also trotz des eindeutig bestimmten Konzentrationsmaximums recht willkürlich. Dieses Problem tritt bei 5-km-Kanälen seltener auf.
- Schwerer wiegt jedoch, daß bei sporadischen Schichten sehr häufig Höhenänderungen von mehreren Kilometern beobachtet wurden. Bei geringen Kanalbreiten hätte diese Vertikalbewegung die Kanalbreite häufig um mehr als das doppelte überwogen. Folglich wäre die Einordnung in einen bestimmten schmalen Höhenkanal kaum repräsentativ. Das Problem, daß unvollständig beobachtete Schichten einem falschen Kanal zugeordnet worden wären, hätte sich in diesem Falle noch verschärft. Auch die Fehleinordnung aufgrund veränderlicher Absinkgeschwindigkeiten wäre hier noch gravierender zu Tage getreten.

Tab. 5.1: Höhenverteilung sporadischer Schichten von Ca und Ca⁺. Die Gesamtzahlen pro Höhenkanal (Spalte 2 und 3) beziehen sich auf alle Beobachtungen dieser Spezies, die drei Spalten rechts dagegen nur auf simultane Sondierungen.

Höhe [km]	Ca _s	Ca ⁺ _s	Ca _s und Ca ⁺ _s	Ca _s ohne Ca ⁺ _s	Ca ⁺ _s ohne Ca _s
> 110	2	11	1	1	10
105–110	4	16	1	0	15
100–105	9	24	2	1	22
95–100	22	23	8	2	14
90–95	44	24	21	5	4
< 90	8	1	1	1	0
Gesamt	89	99	34	10	65

Man erkennt in Tab. 5.1 ein deutliches Maximum der Ca_s -Häufigkeit zwischen 90 und 95 km. Unterhalb von 90 km wurden nur rund 10% aller sporadischen Ca-Schichten beobachtet. Dagegen konnte nur eine einzige Ca^+_s (1%) in dieser Höhe entdeckt werden. Zwischen 90 und 105 km Höhe ergibt sich eine nahezu konstante Verteilung mit jeweils fast 25% aller Ca^+_s pro 5 km. In Abb. 5.7 ist die Höhenverteilung der Ca_s und Ca^+_s grafisch dargestellt.

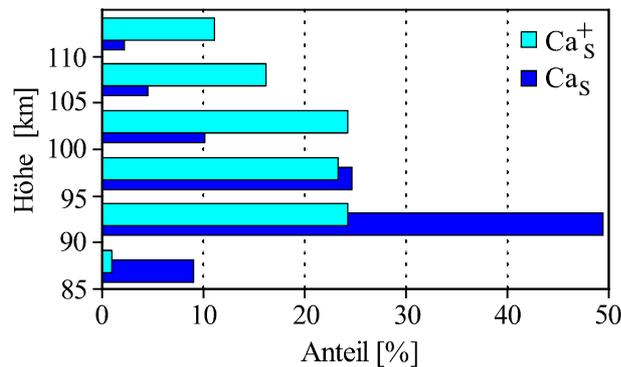


Abb. 5.7: Höhenverteilung sporadischer Ca- und Ca^+ -Schichten entsprechend Tab. 5.1 (Spalten 2 und 3)

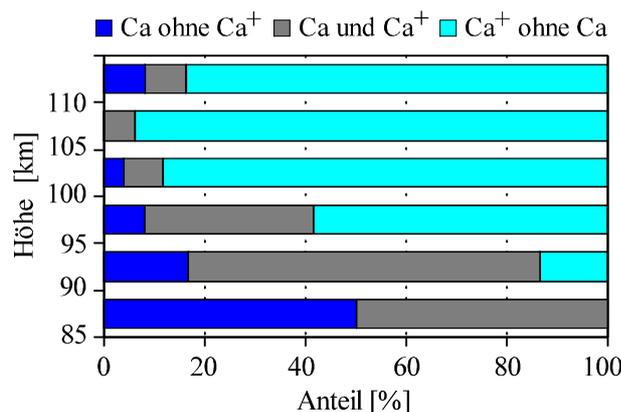


Abb. 5.8: Höhenverteilung einzelner und gemeinsamer Ca_s und Ca^+_s . Betrachtet wurden nur simultane Sondierungen entsprechend Tab. 5.1 (Spalten 4 bis 6).

In den 58 Nächten mit gemeinsamen Ca/ Ca^+ -Sondierungen konnte beobachtet werden, in welchen Höhen gemeinsame sporadische Schichten auftraten bzw. in welchen Höhen eine Spezies dominierte. Die drei rechten Spalten in Tab. 5.1 und Abb. 5.8 stellen diese Zahlen gegenüber. Man erkennt, daß der Anteil alleiniger neutraler sporadischer Schichten mit der Höhe abnimmt. Gemeinsame sporadische Schichten haben mit rund 70% zwischen 90 und 95 km Höhe den größten Anteil. In größeren Höhen nimmt dieser Anteil ebenfalls stark ab. Entsprechend nimmt der Anteil alleiniger sporadischer Ionenschichten mit der Höhe zu und erreicht oberhalb von 100 km rund 90% oder mehr. Einzelne neutrale sporadische Schichten wurden in dieser Höhe nur zweimal beobachtet (4./5. März 1997 und 28./29. Juni 1998) und spiegeln damit die geringe Konzentration neutralen Calciums im Jahresmittel in diesem Höhenbereich wieder (vgl. Abschnitt 3.2.1).

5.2.2 Saisonale Verteilung sporadischer und „hoher“ Ca-Schichten

Für die Betrachtung jahreszeitlicher Variationen der sporadischen Aktivität wurde für jede einzelne Nacht die Meßdauer und die Dauer der einzelnen Ca_s ermittelt. Beide Zeiten wurden getrennt monatsweise addiert. Anschließend wurde der Anteil der Meßzeit mit sporadischen Schichten an der Gesamtmeßzeit ermittelt. Sind zu einer bestimmten Zeit mehrere Ca_s in den Daten sichtbar, tragen beide Ca_s additiv zum Anteil sporadischer Schichten bei. Eine Gewichtung mit der Stärke der sporadischen Schicht erfolgt nicht.

Abbildung 5.9 zeigt den Anteil von Beobachtungszeit mit sporadischen Schichten für die einzelnen Monate des Jahres. Der Jahresgang zeigt ein deutliches Minimum sporadischer

Aktivität in den Monaten Mai bis August. Im Frühjahr und Herbst werden sporadische Schichten sehr viel häufiger beobachtet. Im Januar zeigten sich wiederum in gut 10% der Meßdauer sporadische Schichten, was ein Hinweis auf halbjährliche Variationen sein kann. Der höhere Anteil sporadischer Aktivität im Monat Dezember scheint dieses Bild auf den ersten Blick zu stören. Jedoch erfolgten 3 der 5 Dezember-Sondierungen (gezielt) zur Monatsmitte. In diesen Zeitraum fällt jedoch auch das Maximum des Meteorschauers der *Geminiden*. Eine weitere Messung Anfang Dezember lag zur Zeit der (schwächeren) Meteorschauer der χ -*Orioniden* und der *Monocerotiden*. Meteorschauer werden als eine mögliche Ursache für sporadische Metallschichten genannt [Hake et al., 1972; Clemesha et al., 1978]. Dieser Bildungsmechanismus wird im Abschnitt 5.4 weiter diskutiert.

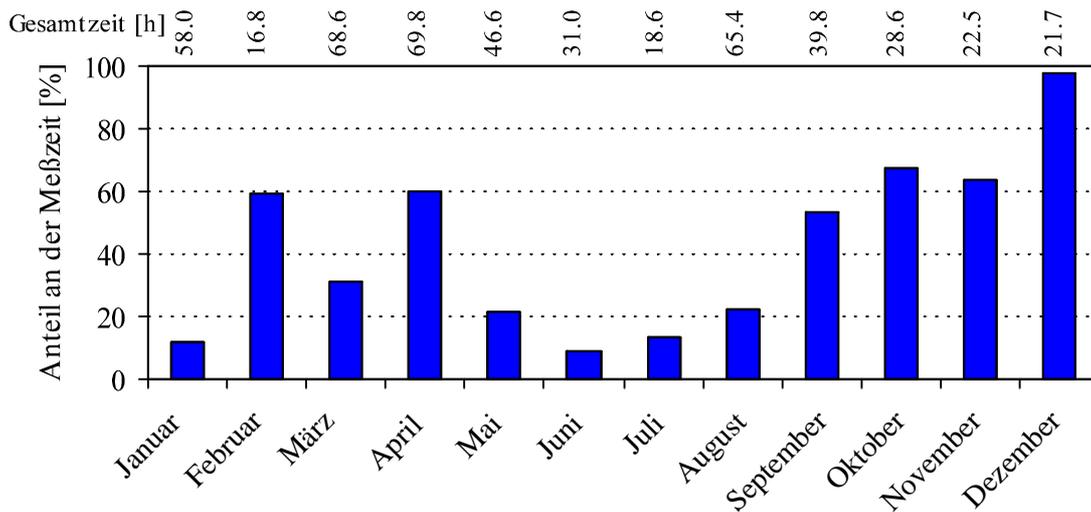


Abb. 5.9: Saisonale Variation der Häufigkeit sporadischer Ca-Schichten. Die Zahlen über dem Diagramm geben die gesamte Meßzeit in diesem Monat wieder.

Aber nicht nur die Häufigkeit sporadischer Schichten variiert von Monat zu Monat. Auch der Anteil der einzelnen Höhenkanäle an allen Ca_s -Ereignissen zeigt deutliche saisonale Schwankungen: Zwischen September und April liegt der Anteil der sporadischen Schichten über 100 km durchgehend unter ca. 30%, in manchen Monaten wurde gar keine Ca_s in dieser Höhe beobachtet. Von Mai bis August treten jedoch vermehrt auch hohe Ca_s auf, der Anteil liegt jeweils über ca. 30%. Abbildung 5.10 vergleicht die Anteile der verschiedenen Höhenbereiche an der Gesamtzeit der Ca_s -Beobachtungen.

Der saisonalen Verteilung sporadischer Schichten steht das Auftreten sog. „hoher Schichten“ gegenüber, die bereits im Abschnitt 5.1.4 beschrieben wurden. Die „hohen Schichten“ werden oberhalb von 100 km beobachtet, sind breiter als sporadische Schichten und zeigen kaum zeitliche Variation. Aufgrund eines Konzentrationsminimums zwischen permanenter Schicht und „hoher Schicht“ kann man letztere auch nicht den permanenten Schichten zuordnen. Wie die Tab. 5.2 zeigt, wurden „hohe Schichten“ ausschließlich in den Monaten Mai bis September beobachtet, die stärkeren Schichten mit Maximalkonzentrationen über 5 cm^{-3} nur von Juni bis August. Das Häufigkeitsmaximum fällt damit genau in das Häufigkeitsminimum

der sporadischen Schichten. Man kann jedoch nicht davon sprechen, daß im Sommer die Ca_s durch „hohe“ Ca-Schichten ersetzt werden, da

- in einigen Fällen neben „hohen Schichten“ auch sporadische Schichten beobachtet wurden und
- gerade die Ca_s oberhalb von 100 km ihren größten Anteil ebenfalls in den Monaten Mai bis August haben.

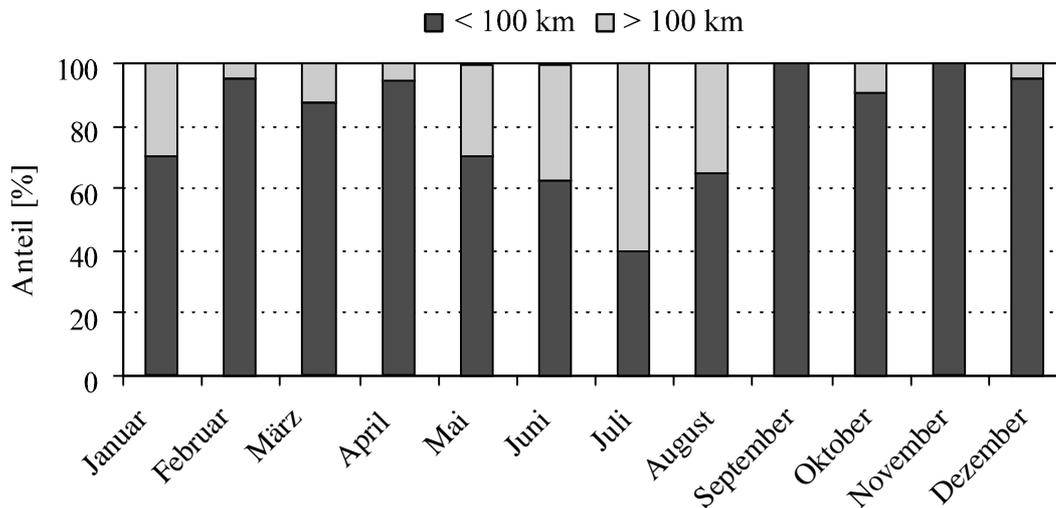


Abb. 5.10: Anteile sporadischer Ca-Schichten über und unter 100 km an der Gesamtzeit der Ca_s-Ereignisse (nach Monaten)

Tab. 5.2: Anzahl der Nächte mit „hohen Schichten“ für verschiedene Monate. In den Monaten Oktober bis April wurden keinen „hohen Schichten“ beobachtet.

Monat	Anzahl „hoher Schichten“ ^{a)}	Anzahl starker „hoher Schichten“ ^{b)}
Mai	1	0
Juni	8	3
Juli	1	1
August	7	3
September	2	0

^{a)} „Hohe Schicht“: Ca-Konzentration größer 1 cm^{-3} in 105 km Höhe im Nachtmittel mit einem Minimum zwischen „hoher“ und permanenter Schicht oder Ca-Konzentration größer 1 cm^{-3} in 110 km Höhe oder höher

^{b)} Starke „hohe Schicht“: Ca-Konzentration größer 5 cm^{-3} oberhalb von 105 km Höhe im Nachtmittel

5.3 Diskussion der Verteilung sporadischer Schichten

5.3.1 Die Höhenstrukturen sporadischer Ca- und Ca⁺-Schichten

Im Abschnitt 5.2 wurde von der beobachteten Höhendifferenz zwischen dem Maximum der Ca_s-Verteilung und dem Maximum der Ca-Schicht berichtet. Auch in den langjährigen Beobachtungen von Natrium oder Eisen wurden die sporadischen Schichten meist höher beobachtet als das Maximum der permanenten Schicht. So geben Hansen und von Zahn [1990] die

mittlere Höhe der insgesamt 75 über Andenes, Norwegen (69°N, 16°O) gemessenen Na_s mit 95 km an, gegenüber einem Maximum der Na-Schicht in 90 km. Der Datensatz umfaßt 378 Stunden zwischen Herbst 1985 und Herbst 1987. *Clemesha* [1995] hat die mehrjährigen Beobachtungen in Sao José dos Campos, Brasilien (23°S, 46°W) zusammengefaßt und findet eine mittlere Höhendifferenz zwischen Schichtmaximum und mittlerer Höhe sporadischer Na-Schichten von ca. 2 km. Die in hohen und niedrigen geographischen Breiten für Natrium gemessenen Werte entsprechen damit gut der in Kühlungsborn für Ca gemessenen Höhendifferenz von 3-4 km, wobei die mit 5 km deutlich größere Kanalbreite der hier benutzten Ca_s-Statistik berücksichtigt werden muß.

Nur in zwei Arbeiten [*Granier et al.*, 1989; *Alpers et al.*, 1996] wurden bisher Beobachtungen von neutralen und ionisierten sporadischen Metallschichten veröffentlicht, in denen die beiden Spezies direkt miteinander verglichen werden konnten. Die Sondierungen von Ca/Ca⁺ zeigen wie die in dieser Arbeit vorgestellten Daten in einigen Fällen eine Korrelation von ionisierten und neutralen sporadischen Schichten und in anderen genauso Ca⁺_s ohne Ca_s.

Alpers et al. [1993] berichten über eine Multi-Instrument-Kampagne zur Untersuchung von Metallschichten in polaren Breiten. Daran war auch ein Fe-Lidar sowie ein raketengetragenes Ionen-Massenspektrometer beteiligt, die erstmals *simultane* Beobachtungen neutraler und ionisierter Metalle in einer sporadischen Schicht ermöglichten. Das Maximum der Fe⁺_s wurde dabei ca. 1 km tiefer beobachtet als das der Fe_s. *Alpers et al.* [1993] sehen den horizontalen Abstand von ca. 26 km zwischen den Beobachtungsvolumina von Lidar und Spektrometer als Ursache der Höhendifferenz. *Gardner et al.* [1993] stellten Ergebnisse zweier Sondierungen sporadischer Na- bzw. Fe-Schichten vor, in denen auch drei Ca⁺-Profile gewonnen wurden (Meßdauer Ca⁺ insgesamt ca. eine Stunde). Diese Daten zeigen eine Höhendifferenz von rund einem Kilometer zwischen den Fe_s/Na_s und dem Maximum der Ca⁺-Schicht. Die Autoren gehen von identischen Höhen der ionisierten und neutralen Schicht *eines* Metalls aus und begründen die Höhendifferenz mit unterschiedlichen Ionenmassen von Na⁺, Fe⁺ und Ca⁺. Dies erklärt aber nicht die dort beschriebene, nahezu identische Höhe der Na_s und Fe_s sowie die in der vorliegenden Arbeit mehrfach gefundene Höhendifferenz der Ca_s und Ca⁺_s.

Die Höhendifferenz von neutralen und ionisierten sporadischen Schichten kann nach den Erkenntnissen aus Kap. 4 aber darauf zurückgeführt werden, daß eine direkte Rekombination von Ca⁺ in Ca sehr unwahrscheinlich ist. Statt dessen reagiert Ca⁺ zunächst zu CaO⁺ oder zu der Komplexverbindung Ca.X₂⁺ (X=O₂, N₂), die mit Elektronen dissoziativ zu Ca rekombinieren. Da CaO⁺ und Ca.X₂⁺ vom Lidar nicht detektiert werden, beobachtet man in vielen Fällen eine Höhendifferenz von Atom- und Ionenschichten. Im Abschnitt 5.4 wird diese indirekte Kopplung von Ca und Ca⁺ ausführlich erläutert.

Das GLO-Instrument hat an Bord des Space Shuttle im Dezember 1992 über einen breiten geographischen Bereich Mg und Mg⁺ höhenaufgelöst detektiert [*Gardner et al.*, 1995]. Die untere Meßgrenze lag allerdings mit 150 km höher als der hier betrachtete Höhenbereich. Neutrales Magnesium konnte nur in 1% aller Sondierungen beobachtet werden, ausschließlich zu Zeiten sehr hoher Mg⁺-Konzentration. In den Kühlungsborner Lidar-Sondierungen wurde

zwischen 100 und 130 km Höhe nur bei sehr großen Ca^+ -Konzentrationen auch neutrales Ca gefunden.

5.3.2 Die saisonale Variation in der Verteilung sporadischer Schichten

Die jahreszeitliche Variation der Häufigkeit von neutralen sporadischen Schichten ist bisher in der Literatur noch kaum dokumentiert. Einzig *Nagasawa und Abo* [1995] veröffentlichten aus einem fast zwei Jahre überdeckenden Datensatz aus Tokio (36°N , 140°O) die Sondierung von insgesamt 37 sporadischen Na-Schichten.

Die saisonale Verteilung zeigt eine jährliche Variation mit einem deutlichen Maximum im Sommer. Unklar ist die Ursache des vollständigen Fehlens sporadischer Schichten im September und Oktober trotz durchschnittlicher Beobachtungszeit (zusammen ca. 159 h). Insgesamt wurden in ca. 6% der Meßzeit auch Na_S beobachtet. Abbildung 5.11 stellt die saisonalen Variationen der Ca_S in Kühlungsborn (vgl. Abb. 5.9) und der Na_S in Tokio gegenüber. Man erkennt einen nahezu antizyklischen Verlauf der beiden Kurven. Mit rund 40% der Gesamtmeßzeit liegt der Anteil der Ca_S deutlich höher. Zum Vergleich enthält die Abbildung auch den ähnlichen saisonalen Verlauf der Häufigkeit nächtlicher sporadischer Elektronenschichten für die Standorte Tokio und Juliusruh/Rügen (ca. 120 km östlich von Kühlungsborn).

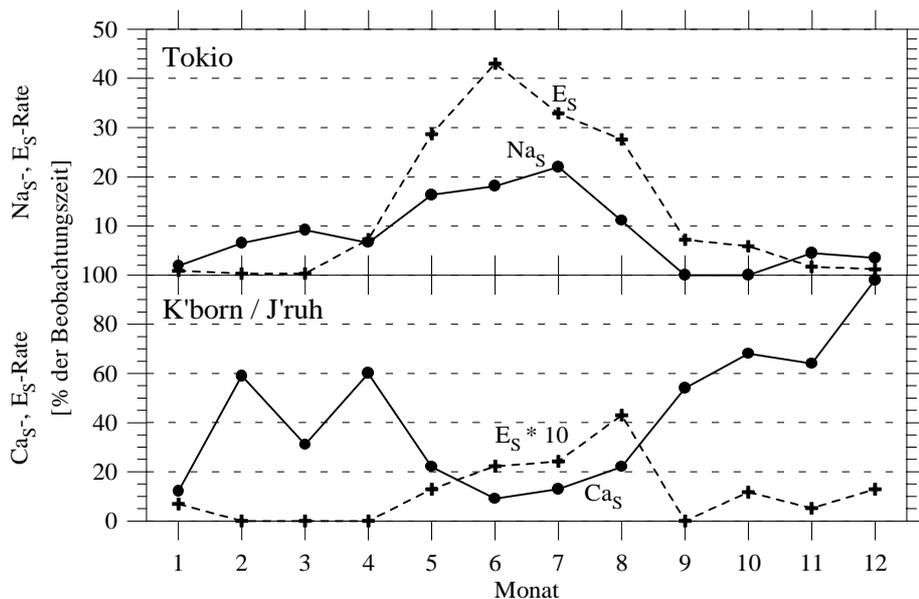


Abb. 5.11: Saisonale Variationen der Na_S und E_S über Tokio (oben) [*Nagasawa und Abo*, 1995] und der Ca_S über Kühlungsborn (unten). Zum Vergleich: E_S -Häufigkeit 1997 über Juliusruh/Rügen (Daten: *J. Bremer* [persönliche Mitteilung]). Es wurden nur E_S mit einer Grenzfrequenz $f_o\text{ES} > 5$ MHz betrachtet. Alle Daten beziehen sich auf die Nachtstunden.

Aus Vergleichen von Elektronen- und Metallionendichten (z.B. *Herrmann et al.* [1978], *Alpers et al.* [1996]) erwartet man eine Korrelation der E_S mit Ca^+ -Schichten. In Abb. 5.14 ist dazu die Häufigkeit sporadischer Ca^+ -Schichten monatsweise dargestellt. Entgegen dem E_S -Jahresgang in Abb. 5.11 ist hier kein Jahresgang erkennbar. Betrachtet man aber die bei einer bestimmten Elektronendichte zu erwartende Ca^+ -Dichte, stellt sich die Ionosonde als ein deutlich unempfindlicheres Meßinstrument für geladene sporadische Schichten heraus: Aus der

minimalen Plasmafrequenz für Ionosondenmessungen von ca. 1,5 MHz ergibt sich eine minimale Elektronendichte von 30.000 cm^{-3} . Das Ca^+ /Elektronen-Verhältnis beträgt in sporadischen Schichten ca. 0,01 [Herrmann *et al.*, 1978; Alpers *et al.*, 1996], so daß also erst bei Ca^+ -Konzentrationen von mehr als ca. 300 cm^{-3} mit dem gleichzeitigen Auftreten von sporadischen E-Schichten zu rechnen ist. Die Abb. 5.12 enthält deswegen auch die Häufigkeit von Ca_s^+ mit Ionendichten von mehr als 300 cm^{-3} , getrennt für die Bereiche über und unter 100 km. Betrachtet man die hohen Ca_s^+ , so erkennt man wie bei den E_s ein Maximum der Häufigkeit im Sommer. Auffällig ist die dominante Rolle tiefer starker Ca_s^+ im September und Oktober. Diese korreliert mit der hohen Zahl neutraler sporadischer Ca-Schichten in dieser Zeit.

Auch für die neutralen sporadischen Schichten wurde eine Unterscheidung nach der Stärke der Ca_s durchgeführt. Diese ergab jedoch keine Abhängigkeit der saisonalen Variation von der Stärke der Schicht. Daneben wurde auch der Jahresgang der sporadischen E-Schichten in Abhängigkeit von Höhe oder Stärke der Schicht untersucht. Auch hier ergaben sich keine Änderungen zur Situation in Abb. 5.11.

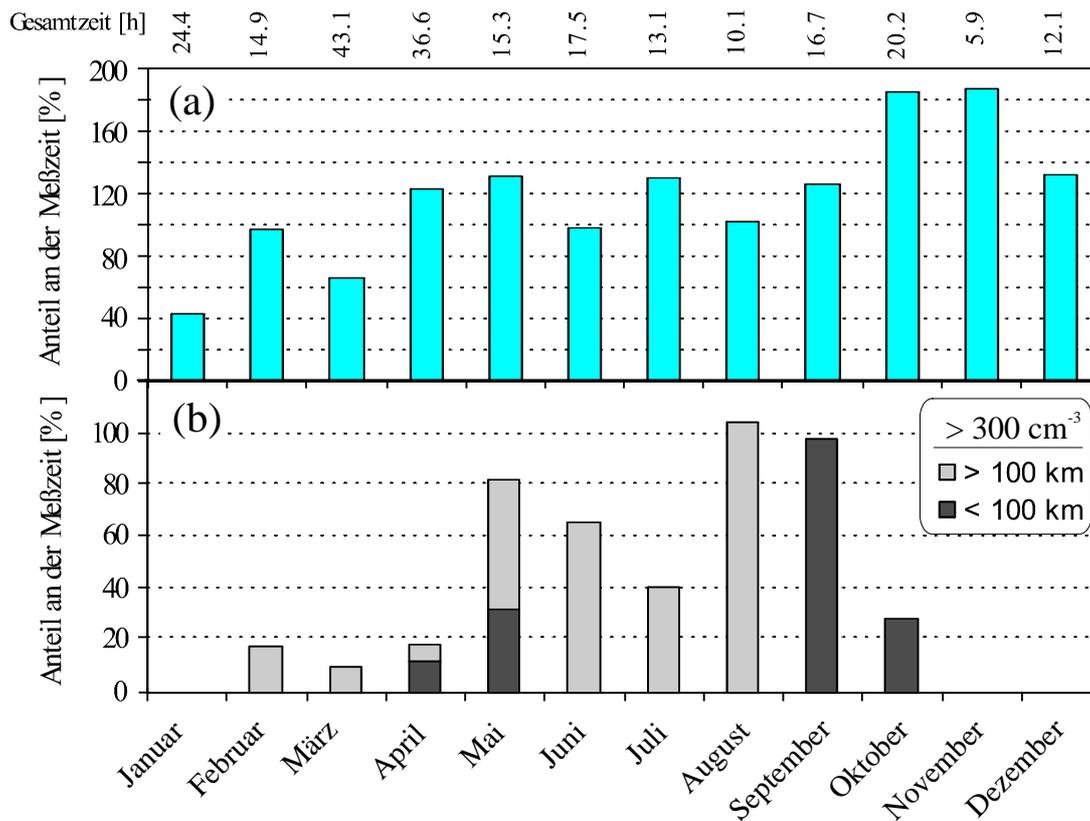


Abb. 5.12: Jahresgang der Häufigkeit sporadischer Ca^+ -Schichten. a) alle Ereignisse, b) nur Ereignisse mit Ca_s^+ -Konzentrationen über 300 cm^{-3}

Der Datensatz von Nagasawa und Abo [1995] unterscheidet sich nicht nur von dem hier beschriebenen Ca-Datensatz, sondern auch von den sehr seltenen Beobachtungen von Na_s an vergleichbaren geographischen Positionen [Gibson und Sandford, 1971; Megie und Blamont, 1977; Senft *et al.*, 1989; Gardner *et al.*, 1993]. Nagasawa und Abo [1995] erklären diese Diskrepanz mit unterschiedlichen geomagnetischen Positionen und einer vergleichsweise sehr

hohen Zahl sporadischer E-Schichten über Japan (vgl. *Whitehead* [1970]). In vergleichbarer geomagnetischer Breite zu Tokio beobachteten wiederum *Kwon et al.* [1988] im Januar in rund 25% der Meßzeit sporadische Na-Schichten.

Umfangreiche Datensätze zu Na_S-Schichten von anderen Standorten sind auf Kampagnen-Messungen beschränkt und decken nicht das vollständige Jahr ab (u.a. *Batista et al.* [1989], *Hansen und von Zahn* [1990]). In den Veröffentlichungen zu sporadischen Eisen-Schichten werden vor allem Fallstudien [*Bills und Gardner*, 1990] oder breitenabhängige Variationen beschrieben [*Alpers et al.*, 1994]. Die geringe Zahl an Ca-Sondierungen an anderen Standorten als Kühlungsborn erlaubt ebenfalls keine Aussage über die saisonale Variation sporadischer Schichten [*Granier et al.*, 1989; *Alpers et al.*, 1996].

5.4 Ergebnisse der Untersuchung sporadischer Ca- und Ca⁺-Schichten

5.4.1 Möglichkeiten der Entstehung sporadischer Schichten

Obwohl sich schon viele Arbeiten mit sporadischen Schichten neutraler oder ionisierter Metalle beschäftigt haben (z.B. *von Zahn und Hansen* [1988], *Kirkwood und von Zahn* [1993], *Gardner et al.* [1993], *Alpers et al.* [1994]), ist die Entstehung dieser Schichten nicht vollständig geklärt. *Clemesha* [1995] hat die veröffentlichten Arbeiten gegenübergestellt. Dabei nennt er verschiedene Entstehungsmechanismen, kommt aber nicht zu einer abschließenden Theorie. Für mittlere geographische Breiten kommen die folgenden Mechanismen in Frage:

- (1) Verdampfung von Meteoroiden in einem engen Höhenbereich oder Deposition in einem breiteren Höhenbereich und spätere Umverteilung der verdampften Metalle durch Windscherungen [*Clemesha et al.*, 1978 und 1988].
- (2) Desorption von Metall-Atomen von den Oberflächen (geladener) mesosphärischer Aerosole, die von rekondensierten Meteoroiden gebildet werden (siehe Kap. 6), durch Stöße mit Ionen oder durch Wechselwirkung mit starken sporadischen E-Schichten [*von Zahn et al.*, 1987; *Beatty et al.*, 1989; *Kirkwood und von Zahn*, 1991],
- (3) Dissoziation von Metall-Molekülen, z.B. $\text{NaHCO}_3 + e^- \rightarrow \text{Na} + \text{HCO}_3^-$ [*von Zahn und Murad*, 1990],
- (4) Umverteilung der permanenten Metallschicht zu schmalen Schichten aufgrund von vertikalen Winden, die wiederum von Schwerewellen erzeugt werden [*Kirkwood und Collis*, 1989] sowie
- (5) Rekombination von Metall-Ionen aus sporadischen Ionenschichten, die zusammen mit sporadischen E-Schichten auftreten (u.a. *Alpers et al.* [1993], *Kirkwood und von Zahn* [1993]).

Auch die mit dem Kühlungsborner Metall-Doppellidar durchgeführten Sondierungen führen nicht zu einer einheitlichen Entstehungstheorie für alle sporadischen Schichten. Die Hauptschwierigkeit bilden die großen Unterschiede in der saisonalen Variation der Häufigkeiten sporadischer Ca-Schichten und sporadischer E-Schichten. Der in vielen Arbeiten zu Fe und Na favorisierte Mechanismus (5) scheint damit für Ca eine geringere Rolle zu spielen. Statt

dessen muß die große Ca_s -Häufigkeit im Frühjahr und Herbst erklärt werden. Dies führt zur Diskussion weiterer Entstehungsmechanismen:

- (6) Dissoziation von Ca-Clustern, die sich in Meteorspuren durch Rekondensation verdampften Calciums gebildet haben [*Schofield*, 1992],
- (7) Bildung von Erdalkalimetall-Kationen besonders in Gebieten erhöhter O-Konzentration und Rekombination zu Metall-Atomen [*Plane und Helmer*, 1994].

Nicht alle Mechanismen kommen als Ergänzung zu (5) für die Erklärung des Jahresgangs der sporadischen Schichten in Frage. Da *Clemesha* [1995] bereits die verschiedenen Bildungswege diskutiert hat, sollen hier nur noch ergänzende Argumente erläutert werden. Während die Veröffentlichungen zu sporadischen Na-Schichten immer auch die starke Säulendichteerhöhung durch die Na_s berücksichtigen mußten (vgl. z.B. *Beatty et al.* [1988], *Hansen und von Zahn* [1990], *Kane et al.* [1993b], *Cox und Plane* [1998]), wurde für Ca kein Zusammenhang zwischen der Säulendichte und dem Auftreten von Ca_s gefunden. Damit bleiben Mechanismen möglich, die keine oder nur eine geringe Menge Calciums bilden.

In mehreren Fällen wurde eine Häufung von Ca_s während oder kurz nach einem Meteorschauer beobachtet. Wie im Kap. 6 erläutert wird, hängt das Verdampfungsprofil eines Metalls aus einem Meteoroiden jedoch stark von verschiedenen Parametern wie Geschwindigkeit und Eintrittswinkel der Teilchen ab. Die im Herbst/Winter erhöhte Zahl von Meteorschauern mit hohen Partikelgeschwindigkeiten [*Jenniskens*, 1994; *Rendtel et al.*, 1995] weist außer auf eine größere Dichte der „ungestörten“ Ca-Schicht (Kap. 3 und 4) auch auf einen möglichen Zusammenhang mit der in diesem Zeitraum besonders großen Zahl von Ca_s hin. Andererseits korrelierte bisher der Meteorschauer der *Quadrantiden* (Maximum ca. 4. Januar) weder mit der Beobachtung sporadischer Ca-Schichten noch mit einer erhöhten Ca-Dichte.

Der Weg (3) entspricht der Rückwandlung aus einer chemischen Senke. Im Unterschied zu anderen Metallen [*Helmer et al.*, 1998; *Plane et al.*, 1999] überwiegt jedoch innerhalb der Ca-Schicht schon oberhalb von 90 km die Ca^+ -Konzentration über die Konzentration des atomaren Ca (vgl. Abschnitt 3.2.1). Im Kap. 4 wurde gezeigt, daß verschiedene Ca-Senken wie CaCO_3 oder Ca(OH)_2 nur unterhalb von 90 km einen ausreichend großen Anteil am Gesamt-Calcium haben. In dieser Höhe sind Ca_s aber sehr selten.

5.4.2 Mögliche Höhendifferenzen bei der Entstehung von Ca_s aus der Rekombination von Ca^+_s

Schon seit vielen Jahren ist die Anreicherung von Elektronen in der E-Schicht der Ionosphäre bekannt (z.B. *Wells* [1946]). Verschiedene Veröffentlichungen haben seitdem die Anreicherung von Metallionen und von Elektronen aus einem großen Höhenbereich in dünnen Schichten aufgrund von Windscherungen sowie bestimmten Konstellationen von elektrischen und magnetischen Feldern beschrieben (z.B. *Chimonas und Axford* [1968], *Kirkwood und von Zahn* [1991], *Höffner und von Zahn* [1994]), so daß die Bildung von sporadischen Ca^+ -Ionschichten hier nicht weiter erläutert zu werden braucht. Die Erklärung des Jahresgangs der E_s -

Häufigkeit ist allerdings noch Inhalt der Forschung [Whitehead, 1989]. Jüngste Arbeiten geben einen Hinweis auf einen Zusammenhang mit planetaren Wellen [Voiculescu, 1999].

Bei der Betrachtung der Verteilung gemeinsamer sporadischer Schichten und reiner Ionen- oder Atomschichten fällt auf, daß oberhalb von 95 km fast zwei Drittel aller sporadischen Ca^+ -Schichten nicht mit neutralen Schichten korreliert sind (vgl. Abb. 5.8). Mehrfach wurde außerdem eine Höhendifferenz zwischen ionisierten und neutralen sporadischen Schichten von mehreren Kilometern oder eine Phasendifferenz der Dichten wie in Abb. 5.4 beobachtet. Man kann deswegen nicht von einer schnellen chemischen Umwandlung von Ca^+ -Ionen in neutrale Ca-Atome und der Einstellung eines chemischen Gleichgewichts sprechen. Bei sehr schneller, direkter Rekombination von Ca^+ mit freien Elektronen in atomares Ca würde eine sporadische Ca-Schicht jedoch jeder horizontalen oder vertikalen Bewegung der Ca^+ -Schicht folgen. Laboruntersuchungen von Bates und Dalgarno [1962] bestätigen, daß aus Gründen der Impuls- und Energieerhaltung die direkte Rekombination $\text{Ca}^+ + e^- \rightarrow \text{Ca} + h\nu$ sehr langsam abläuft. Statt dessen reagiert das Ion mit anderen Luftmolekülen und einem Stoßpartner zunächst zu einem Cluster Ca.X^+ (z.B. Ca.N_2^+), der dann zusammen mit freien Elektronen zu $\text{Ca} + \text{X}$ dissoziativ rekombiniert. Daneben ist aber auch noch ein *Ligandentausch* (z.B. $\text{Ca.X}^+ + \text{O} \rightarrow \text{CaO}^+ + \text{X}$) und nachfolgend eine Reaktion mit atomarem Sauerstoff hin zu $\text{Ca}^+ + \text{O}_2$ möglich (vgl. Kap. 4).

Folglich detektiert man bei Erscheinen einer Ca^+_s im Sichtfeld des Lidars nicht automatisch eine neutrale sporadische Ca-Schicht, obwohl das Gleichgewichtsverhältnis von Ionen zu Atomen dies verlangen würde. Statt dessen werden in diesem Höhenbereich

- zum großen Teil reine Ca^+_s -Schichten beobachtet, bei denen noch keine nennenswerte Umwandlung von Ionen in Atome stattgefunden hat,
- zum Teil simultane sporadische Ca/ Ca^+ -Schichten beobachtet, bei denen seit der Entstehung als Ca^+_s genügend Zeit für eine teilweise Rekombination vergangen ist und bei denen auf die Ionen und Atome gleiche oder ähnliche Transportkräfte wirkten, und
- zum Teil reine Ca_s -Schichten beobachtet, die ebenfalls aus der Rekombination von Ionenschichten entstanden sein können, bei denen aber die Umwandlung abgeschlossen ist oder deren „Ionen-Teil“ - durch Lorentz-Kräfte verschoben - nicht das Beobachtungsvolumen passiert.

Die mit dem „Umweg“ über Ca.X^+ ablaufende Bildung von Ca_s aus Ca^+_s erklärt auch die gegenüber höheren sporadischen Schichten größere Korrelation von neutralen und ionisierten Schichten zwischen 90 und 95 km Höhe. Da die Umwandlung von Ca^+ über Ca.X^+ in Ca in einer Dreikörperreaktion erfolgt (vgl. Kap. 4), nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit mit dem Quadrat des Luftdruckes zu. Mit zunehmender Höhe verschiebt sich das chemische Gleichgewicht immer weiter zu Gunsten der Ionen, so daß dort *neutrale* sporadische Schichten in der Regel nur noch mit Ionenschichten sehr hoher Dichte korrelieren (vgl. Abb. 5.1). In der stärksten Ca^+_s des Beobachtungszeitraums (18./19.5.1998) lag das Ca^+/Ca -Verhältnis in 108 km Höhe zeitweilig bei ca. 1000:1, allerdings wurde hier das Ca-Maximum ca. 4 km höher beobachtet (Peakdichte-Verhältnis: ca. 600:1). Die sehr unterschiedlichen Ca^+/Ca -Verhältnisse

oberhalb von 100 km zeigen, daß sich keine allgemeine Ca^+ -Schwellendichte für die Beobachtung neutraler Ca-Schichten aus den vorhandenen Beobachtungsdaten ableiten läßt.

5.4.3 Die Entstehung „hoher Ca-Schichten“ ohne Ca^+_s -Schichten

Der Mechanismus einer langsamen dissoziativen Umwandlung von Ionen in Atome kann qualitativ einen Teil der beobachteten „hohen Schichten“ erklären (vgl. Abschnitt 5.1.4). Häufig wurden die „hohen Schichten“ zusammen mit sehr starken sporadischen Ionenschichten beobachtet, die jedoch mehrere Kilometer tiefer lagen und meistens im Lauf der Sondierung noch weiter absanken. Eine mögliche Erklärung für diese selten auftretenden Schichten ist ihre Entstehung aus sehr starken, jedoch nur langsam absinkenden Ionenschichten. Die sehr hohe Ca^+ -Dichte ermöglicht hier die Produktion von Ca-Atomen. Die Absinkbewegung aufgrund elektromagnetischer Felder muß hierbei so groß sein, daß ausreichend Zeit für die Rekombination in Atome bleibt, aber andererseits die dabei gebildete Atom-Schicht vertikal zu weit ausgedehnt ist, um laut Definition als sporadische Schicht interpretiert zu werden. Tatsächlich ist der Übergang zwischen „hohen Schichten“ und Ca_s fließend.

Ca-Schichten, die auf diese Weise entstanden sind, werden durch Ladungsaustausch mit O_2^+ und NO^+ oberhalb von ca. 100 km innerhalb mehrerer Stunden wieder zu Ca-Kationen abgebaut (vgl. Kap. 4). Dies entspricht qualitativ den Beobachtungsdaten, in denen „hohe Schichten“ häufig bis zum Ende der Sondierung über Stunden sichtbar blieben. Da die ionisierten Schichten mehrere Kilometer unterhalb der „hohen Schichten“ oder gar nicht mehr beobachtet wurden, liegt eine Entstehung während des Tages nahe, also zeitlich und räumlich entfernt von der Lidar-Sondierung. Diese Erklärung wird durch dadurch gestützt, daß sowohl die Häufigkeit „hoher Schichten“, als auch sporadischer Ca^+ -Schichten oberhalb von 100 km und sporadischer E-Schichten [Sprenger, 1981] im Sommer maximal wird.

5.4.4 Schwache sporadische Schichten als Besonderheit des atmosphärischen Calciums

Die im Abschnitt 5.4.2 erläuterte Kopplung von E_s , Ca^+_s und daraus entstehenden Ca_s scheint nur für starke sporadische Ionenschichten und – abhängig von der Höhe – ebenfalls starke neutrale Schichten zu gelten. Dieser Mechanismus erklärt aber nicht den gegensätzlichen Jahresgang *aller* Ca_s und der E_s . Die Forderung nach starken sporadischen Schichten vernachlässigt außerdem, daß der Säulendichtezuwachs durch sporadische Ca-Schichten häufig innerhalb der Standardabweichung der „normalen“ Nächte liegt. Die noch ungeklärten Ca-Ereignisse erfüllen aber mit der geringen vertikalen Ausdehnung, dem schnellen Ansteigen und Abfallen der Dichte und z.T. deutlichen Höhenänderungen alle Eigenschaften einer sporadischen Schicht (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Die mittleren Höhenverteilungen von Metall-Atomen und zugehörigen Ionen zeigen große Unterschiede zwischen den verschiedenen Metallen. Der Vergleich der beobachteten sowie modellierten Jahresmittel von Ca und Ca^+ in Abb. 4.6 zeigt, daß bereits oberhalb von 90 km die Ca^+ -Dichte im Durchschnitt größer ist als die des atomaren Ca. Für Fe wird diese Grenze in Gleichgewichtsmodellen mit 93 km angegeben (März-Situation [Helmer *et al.*,

1998]), während für Na das Modell von *Plane et al.* [1999] sogar auf eine Höhe von 101 km kommt (September-Situation). Die anteilige Ca^+ -Konzentration überwiegt zwischen 90 und 100 km also die entsprechenden Konzentrationen anderer Metall-Ionen. Passend dazu werden häufig schwächere Ca^+ -Konzentrationen von mehr als 50 cm^{-3} in schmalen, veränderlichen Schichten beobachtet, die aufgrund ihrer geringen Ionendichte nicht mit E_S korrelieren müssen.

Zur Bildung schwacher sporadischer Schichten von Ca^+ kann man zeigen, daß sich sehr schnell Kationen lokal in der Atmosphäre ansammeln, wenn eine Welle ein bestimmtes Luftvolumen durchläuft und gleichzeitig ein elektrisches oder magnetisches Feld in diesem Volumen wirkt [*Höffner*, 1994]. In den meisten Fällen ist das betroffene Luftpaket jedoch nicht groß genug, um auch genügend Elektronen für eine meßbare sporadische E-Schicht bereitzustellen. Aufgrund der nahezu ständigen Präsenz von Wellenstörungen in der Mesopausenregion kann man lokale Ca^+ -Anreicherungen also ganzjährig erwarten.

Zur Ausbildung einer stabilen sporadischen Ca- und Ca^+ -Schicht müssen jedoch noch weitere Bedingungen erfüllt sein. Ionen von Erdalkalimetallen bilden besonders bei Anwesenheit atomaren Sauerstoffs stabile Kationen, z.B. Ca.O_2^+ , CaO^+ , aber auch Ca^+ [*Plane und Helmer*, 1994], die beteiligten Reaktionen wurden im Kap. 4 genannt. Die Lage des Konzentrationsgleichgewichts zwischen diesen Spezies wird maßgeblich von der Sauerstoff-Konzentration bestimmt. Diese besitzt in knapp 100 km Höhe ein Maximum [*Hedin*, 1991], daß aber durch vertikale Winde leicht um mehrere Kilometer verschoben werden kann. Eine Erhöhung der O-Konzentration in einer bestimmten Höhe führt zu der verstärkten Bildung von Ca^+ aus CaX^+ ($X = \text{O}_2, \text{N}_2, \text{O}$). Aus allen Ca-Kationen kann durch dissoziative Rekombination mit Elektronen atomares Calcium entstehen. Das Verhältnis zwischen den geladenen und ungeladenen Spezies hängt von der Elektronendichte ab, je größer diese lokal ist, desto schneller erfolgt die Konvertierung der Ionen in Atome [*Plane und Helmer*, 1994]. Der Jahresgang der O-Konzentration im Höhenbereich der Ca_S entspricht sehr gut dem Ca_S -Häufigkeitsprofil. Leider sind die Raten der genannten Reaktionen noch nicht im Labor gemessen worden, so daß man allgemein auf Abschätzungen angewiesen ist.

Dieser Mechanismus zur Bildung sporadischer Schichten kann zur Zeit nicht weitergehend experimentell überprüft werden. Notwendig wäre z.B. eine Messung der O-Konzentration und der Elektronendichte innerhalb der sporadischen Schicht. Abgesehen von Standortfaktoren ist die O-Sondierung mit Raketen jedoch zur Zeit noch sehr unsicher [*Gumbel*, 1997]. Auch vertikale Windgeschwindigkeiten können zur Zeit am Standort Kühlungsborn noch nicht gemessen werden. Da jedoch die im Mittel sehr hohe Ca^+ -Konzentration die Bildung gleichzeitiger sporadischer Schichten begünstigt und andererseits mit der Sauerstoffchemie ein geeigneter Prozeß zur Verfügung steht, erscheint dieser Bildungsmechanismus plausibel zur Erklärung der häufigen sporadischen Ca-Schichten über Kühlungsborn.

6 Der Einfluß von Meteoroiden auf die Metallschicht

Als Quelle der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen atmosphärischen Ca-Schicht nimmt man allgemein extraterrestrisches Material an [Gadsden, 1969b]: Kosmischen Staub oder auch größere Teilchen (Meteoroiden), die in Mengen von täglich ca. 110 t [Love und Brownlee, 1993] in die Erdatmosphäre eindringen, aufgrund der Reibung mit den Molekülen der Atmosphäre erhitzt werden und das enthaltene Metall ganz oder teilweise in der Atmosphäre deponieren [Hunten et al., 1980; Brownlee, 1995; Greshake et al., 1998]. Allerdings ist der quantitative Zusammenhang zwischen verdampfendem extraterrestrischem Material und den Metallkonzentrationen in der Metallschicht noch nicht hergestellt [Plane, 1991; McNeil et al., 1998a; von Zahn et al., 1999]. Auch im Kap. 4 mußte eine „Ablagerungseffektivität“ als Skalierungsfaktor zum Ablagerungsprofil von McNeil et al. [1998a] zunächst willkürlich angenommen werden, um die Ca-Menge realistisch abzubilden.

Abhängig von der Größe der in die Atmosphäre eindringenden Meteoroiden können ihre Verdampfungsspuren direkt mit dem Lidar beobachtet werden. Die Mindestgröße der Meteoroiden liegt für Lidar-Sondierungen aufgrund der notwendigen Metallmenge bei ca. 500 µm und damit in etwa zwischen den Werten für Radarsondierungen der Ionisationsspur eines Meteoroiden (ca. 100 µm) und optischen Beobachtungen (Sternschnuppen, *Meteore*) mit ca. 1 mm. Mit dem IAP-Doppellidar konnten bereits in allen untersuchten Metallen (Ca, Ca⁺, Na und Fe) Spuren von Meteoroiden detektiert werden. Fe stellt aufgrund seines hohen Anteils am gesamten kosmischen Metall eine häufige Bezugsgröße dar. Der Vergleich von Ca- mit Fe-Daten ermöglicht Rückschlüsse auf die Stärke der Quelle für die beiden Metalle und damit auf den o.g. Skalierungsfaktor für die Beschreibung der Ca-Schicht. Aus dem Vergleich von Ca- und gleichzeitig sondierten Ca⁺-Ionenspuren erhält man zusätzliche Informationen zum Ablauf des Verdampfens.

An manchen Stellen wird in diesem Kapitel ein Vergleich mit den Metall-Konzentrationen angestellt, die in *Meteoriten* beobachtet wurden. *Meteorite* werden diejenigen Teilchen genannt, die als Reste verdampfender *Meteoroiden* den Erdboden erreichen und z.B. an der Erdoberfläche, am Meeresboden oder im Eis der Antarktis gefunden werden.

Bevor verschiedene Beispiele der Lidar-Beobachtung von Meteoroidenspuren vorgestellt und verglichen werden, erklärt ein einführender Abschnitt die für das Verständnis der Ergebnisse wichtigen Begriffe.

6.1 Grundlagen

6.1.1 Meteoroiden und kosmischer Staub

Man unterscheidet das aus dem Weltall in die Erdatmosphäre eindringende Material nach verschiedenen Eigenschaften, die z.T. Auswirkungen auf das Verdampfungsverhalten und damit auf die atmosphärische Metallschicht haben. Diese Klassifizierung wird im folgenden

vereinfachend zusammengefaßt. Dabei wird der Begriff *Meteoroid* stellvertretend für alle in die Atmosphäre eindringenden Teilchen verwendet.

Man unterscheidet Meteoroiden hinsichtlich ihrer Herkunft nach asteroidalen und kometaren Partikeln mit verschiedenen Geschwindigkeiten, Zusammensetzungen, Dichten, Massenanteilen etc.:

- Asteroidale Meteoroiden entstehen beim Zusammenstoß von Asteroiden vornehmlich innerhalb des Asteroidengürtels zwischen Mars- und Jupiter-Bahn. Aufgrund von Energieverlusten nähern sie sich auf einer Spiralbahn der Sonne [Dohnanyi, 1978; Flynn, 1989] und gelangen dabei in den Bereich der Erdumlaufbahn. Später bewirkt die Erdanziehung ein zusätzliches „Einfangen“ erdnaheer Teilchen [Flynn, 1989]. Der Masseneintrag durch asteroidale Meteoroiden erfolgt relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt (sporadische Meteoroiden).
- Kometare Meteoroiden entstehen aus Teilchen, die sich aus einem Kometen unter dem Druck des Sonnenwinds gelöst und auf der Umlaufbahn des Kometen verstreut haben. Durchfliegt die Erde diese Umlaufbahn, dringen die Bruchstücke des Kometen in die Erdatmosphäre ein und erzeugen z.T. spektakuläre Meteorschauer, z.B. den Leoniden-schauer im November jeden Jahres (z.B. Bone [1993], Littmann [1998]). Ein Teil der kometaren Partikel *dispergiert* allmählich aus der Kometenbahn und bildet z.T. ebenfalls sporadische Meteoroiden.

Zusammensetzung: Asteroiden bestehen aus Material, das im Verlauf der Planetenentstehung mindestens einmal aufgeschmolzen wurde. Extrem leicht flüchtige Stoffe wie z.B. Wasser fehlen in ihnen, so daß sie eine steinige oder metallisch feste Konsistenz haben. Der Anteil der übrigen Elemente entspricht in etwa der innerhalb des Sonnensystems. Kometen dagegen sind Körper, die zur Zeit der Planetenentstehung so weit von der Sonne entfernt waren, daß sie nicht aufgeschmolzen wurden. Sie enthalten darum sehr viel mehr Wasser und andere leicht flüchtige Stoffe [Brownlee, 1985]. Der Anteil der Elemente entspricht der zur Entstehung des Sonnensystems. Ihre Konsistenz wird meist als „dreckiger Schneeball“ bezeichnet [Bone, 1993]. Die meisten durch das Sonnensystem fliegenden Kometen stammen wahrscheinlich aus einem als *Kuiper-Gürtel* bezeichneten Bereich jenseits der Neptun-Bahn (Entfernung zur Sonne 30 bis 50 AE³) [Jewitt und Luu, 1995]. Ein kleiner Teil der Kometen wird auf die sog. *Oortsche Wolke* (Entfernung von der Sonne 20.000 bis 70.000 AE) zurückgeführt, die Berechnungen zufolge aus Körpern gebildet wird, die zuvor durch gravitative Störungen aus dem Kuiper-Gürtel oder dem Bereich der Planeten transportiert wurden [Jewitt und Luu, 1995]. Kometen und Meteoroiden aus dem interstellaren Raum sind bisher nicht nachgewiesen.

Dichte: Die Dichte von Meteoroiden beträgt vor dem Eintritt in die Atmosphäre zwischen ca. 0,3 g/cm³ und 3 g/cm³. Ausschließlich die dichteren, asteroidalen Meteoroiden können als Meteorite die Erdoberfläche erreichen, kometare Teilchen werden aufgrund der Luftreibung zerrissen [Flynn, 1989; Love und Brownlee, 1991]. Nur sehr kleine Partikel mit Durchmessern

³ Eine astronomische Einheit (AE) entspricht der mittleren Entfernung Erde-Sonne und ist festgelegt zu 149 597 870 km.

von wenigen 10 μm schmelzen gar nicht [Brownlee, 1985], sondern verbleiben als Aerosole in der Atmosphäre (siehe unten).

Geschwindigkeit: Entscheidend für das Verdampfungsverhalten von Meteoroiden ist der geozentrische Anteil ihres Geschwindigkeitsvektors (v_g). Die geozentrische Geschwindigkeit schwankt zwischen 11,9 km/s für asteroidale Teilchen, wenn sie nahezu die gleiche Bahngeschwindigkeit wie die Erde besitzen und nur von der Erdgravitation „nachbeschleunigt“ werden, und ca. 72 km/s für die kometaren Meteoroiden der *Leoniden*, die einen hohen Eigenanteil an geozentrischer Geschwindigkeit mitbringen.

Massenanteil: Beobachtet man den Massenfluß von Partikeln aus dem Weltall in die Atmosphäre der Erde über mehrere Jahre, so bringt der stetige Fluß kleiner Staubpartikel mit einem Durchmesser von ca. 0,2 mm (entsprechend $1,5 \cdot 10^{-5}$ g) den größten Anteil [Ceplecha et al., 1998]. Diese Meteoroiden haben überwiegend asteroidale Herkunft [Love und Brownlee, 1993] und können aufgrund ihrer geringen Größe weder mit dem Auge als Meteor noch mit dem Metall-Lidar detektiert werden. Abbildung 6.1 zeigt die Massenverteilung in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Für Teilchenmassen größer als 10^{-2} g steigt die Eintragskurve wieder bis

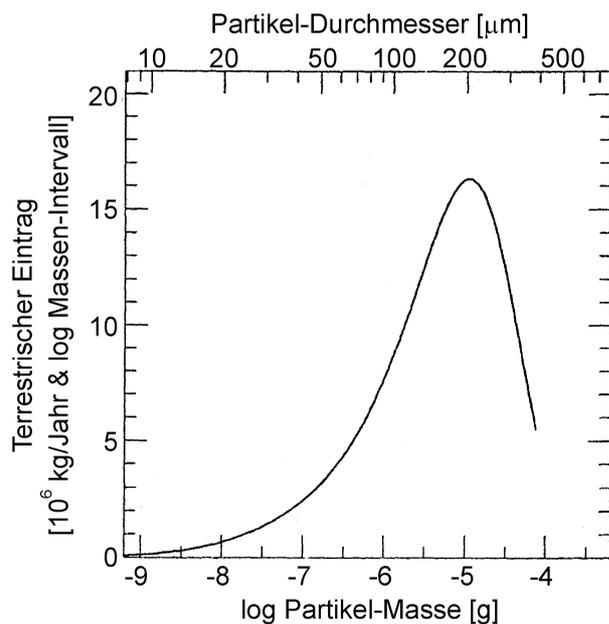


Abb. 6.1: Anteil der verschiedenen Größen am in die Erdatmosphäre einfallenden kosmischen Staub und daraus resultierende Massen bei einer angenommenen Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ [Love und Brownlee, 1993]

zu einem Maximum bei 10^{12} g, jedoch sinkt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen derartiger Körper exponentiell [Ceplecha et al., 1998]. Die saisonale Verteilung des Massenflusses zeigt eine jährliche Variation mit einem schwachen Maximum im Herbst [Hughes, 1978]. Der Massenanteil von Meteorschauern bewirkt nur kurzzeitig eine Erhöhung des durchschnittlichen Massenflusses, z.T. um mehr als 10% [Hughes, 1974]. Im Jahresdurchschnitt ist er mit 0,05-0,3% vernachlässigbar gering [Hughes, 1974; Love und Brownlee, 1993].

Informationen zu Geschwindigkeit und Größe der interplanetaren Staubteilchen lieferten bisher vor allem Radarsondierungen sowie das satellitengestützte LDEF-Experiment (LDEF für *Long*

Duration Exposure Facility) [Brownlee, 1985; Love und Brownlee, 1993]. Die Zusammensetzung konnte bisher nur aus Untersuchungen dreier verschiedener Quellen abgeleitet werden:

- Von Meteoriten, die inzwischen in großer Zahl in der Antarktis und am Meeresboden gesammelt oder als „Steine“ an anderen Orten gefunden wurden (z.B. der Allende-Meteorit) [Kerridge und Matthews, 1988; Flynn, 1989] sowie

- von in der Stratosphäre gesammelten interplanetaren Staubteilchen (IDP, Brownlee-Teilchen) kleiner als ca. 50 µm [Arndt et al., 1996; Brownlee et al., 1997].
- Mit optischen Spektrometern können die Linienstärken der Gase in den Leuchtspuren großer Meteore ausgewertet und auf die Massenanteile der Elemente in der Umgebung des Partikels geschlossen werden. Mit zunehmender Meteor-Geschwindigkeit steigt jedoch auch der Anteil des Leuchtens der Umgebungsluft am gemessenen Signal.

Die erste Quelle hat den Nachteil, daß der Meteoroid beim Flug durch die Atmosphäre mindestens außen aufgeheizt wurde, so daß der Anteil leichter flüchtiger Metalle wie Na oder K geringer ist, als vor Eintritt in die Erdatmosphäre [McNeil et al., 1998b]. Ähnliches wird auch von IDPs berichtet [Brownlee et al., 1997], die in ihrem Aufbau ansonsten deutlich von Meteoriten abweichen [Flynn, 1989] und deshalb nicht als repräsentativ gelten. Bei den Untersuchungen wurden verschiedene Mineralien auch in einzelnen Meteoriten isoliert und nachfolgend genannte Typen unterschieden:

Den weitaus größten Anteil stellen die *Chondrite*, unter denen nach karbonisierten Typ I Chondriten (CI-Chondrite), H-, L- und LL-Chondriten unterschieden wird. Der Metallanteil in diesen Chondriten ist etwas unterschiedlich, der Name deutet auf einen hohen (H) oder relativ geringen (L und LL) Fe-Gehalt. Das Verhältnis der Metalle untereinander schwankt jedoch nur wenig. Rund 90% aller in der Antarktis gefundenen Meteorite sind vom H- oder L-Typ [Kerridge and Matthews, 1988]. Die sehr ähnliche CI-Zusammensetzung wird dagegen als am meisten repräsentativ für den protosolaren Nebel angesehen und dient auch hier als ständiger Vergleich [Kerridge und Matthews, 1988; McNeil et al., 1998b]. Tabelle 6.1 stellt die Anteile verschiedener Metalle in CI-Chondriten gegenüber. Neben den Chondriten findet man Achondrite, Eisen-Meteorite und Stein-Eisen-Meteorite, die jeweils sehr unterschiedliche Anteile von Metallen bzw. Nichtmetallen wie Kohlenstoff und Sauerstoff zeigen. Meteorite sind jedoch keine homogenen Körper: Die Anteile der verschiedenen Elemente können auch innerhalb eines einzelnen Meteoriten stark schwanken [Kerridge und Matthews, 1988].

Tab. 6.1: Anteile verschiedener Metalle an der Zusammensetzung von CI-Chondriten [Kerridge und Matthews, 1988]

Metall	Teilchenzahl-Anteil in CI-Chondriten (rel. zu Fe)
Fe	1
Ca	0,068
Na	0,063
K	0,0042

6.1.2 Die Zusammensetzung von CI-Chondriten und der atmosphärischen Metallschicht

Die Gesamtdichten der verschiedenen Metalle in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre unterscheiden sich stark voneinander. Dies verwundert zunächst nicht weiter, da auch die Zusammensetzung des kosmischen Staubes unterschiedliche Anteile von Ca, Na, Fe, oder K zeigt. Die seit Mitte 1996 am Standort Kühlungsborn routinemäßig ermittelten Kaliumprofile [Eska *et al.*, 1998] zeigen eine rund doppelt so große K-Säulendichte im Vergleich zu Ca. Dabei beträgt der K-Anteil in den CI-Chondriten nur rund ein 16tel des Ca-Anteils [Kerridge und Matthews, 1988]. Dieser Vergleich läßt sich für Natrium und Eisen fortsetzen: Die von Kane und Gardner [1993b] beobachtete Na-Säulendichte ist im Jahresmittel 250mal größer als die Ca-Säulendichte, obwohl beide Metalle in CI-Chondriten ungefähr gleich häufig sind [Kerridge und Matthews, 1988]. Das Fe/Ca-Verhältnis in der Atmosphäre beträgt rund 500 [Kane und Gardner, 1993b; diese Arbeit], in CI-Chondriten aber nur ca. 15. Die Säulendichte-Werte von Kane und Gardner [1993b] sind dabei kein Einzelfall, sondern werden von dem Kühlungsborner Datensatz bestätigt. Abb. 6.2 stellt die Metall-Verhältnisse in CI-Chondriten und in der Atmosphäre gegenüber. Daneben zeigt die Abbildung auch die in der Atmosphäre gemessenen Ionen-Säulendichten der beschriebenen Metalle [Kopp, 1997].

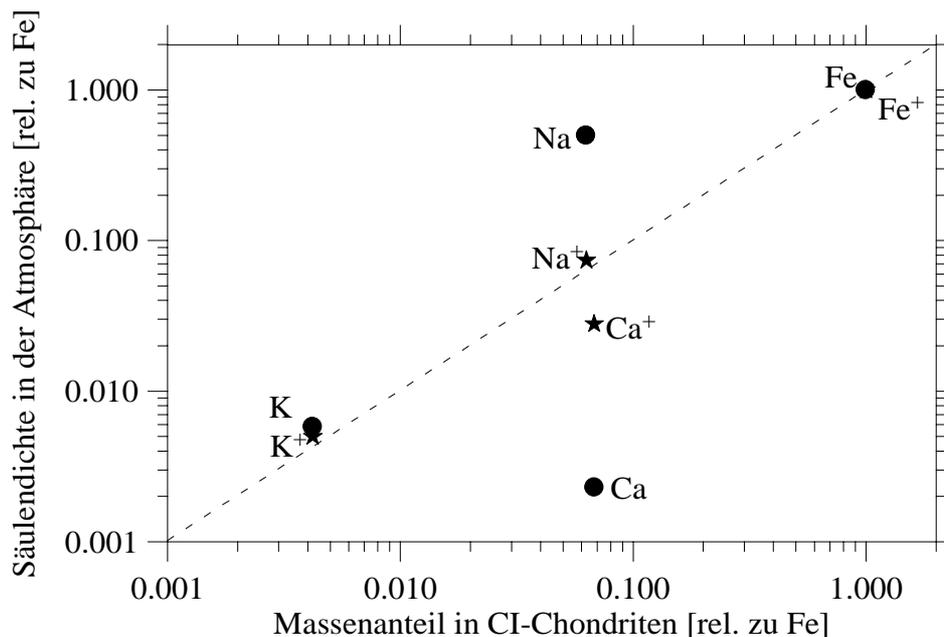


Abb. 6.2: Säulendichteverhältnisse der atmosphärischen Atome und Ionen im Vergleich mit den Massenanteilen in CI-Chondriten (Quellen der Daten: siehe Text)

Für die auffälligen Abweichungen zwischen den solaren und den atmosphärischen Metallanteilen – bei Calcium ca. ein Faktor 30 - gibt es verschiedene Erklärungsansätze:

- Das tatsächlich in die Atmosphäre eindringende kosmische Material besitzt andere Element-Verteilungen als bisher angenommen. In der Tat wurden bisher die Metall-Anteile des verdampfenden Materials nicht *direkt* gemessen.

- Das in die Atmosphäre eindringende Material entspricht zwar der solaren Zusammensetzung, das Verdampfen erfolgt aber nicht gleichzeitig und/oder vollständig für alle Metalle [McNeil *et al.*, 1998b]. Statt dessen werden die verschiedenen Metalle in unterschiedlichen Höhen und möglicherweise in Form unterschiedlicher Moleküle oder Ionen abgelagert. Mit bodengebundenen Lidars können aber nur atomare Metalle sowie das Ca-Ion als einziges Ion erfaßt werden.
- Die chemische Umsetzung unterscheidet sich für die verschiedenen Metalle, so daß sich unterschiedliche Gleichgewichtskonzentrationen einstellen [Plane, 1991].
In den folgenden Abschnitten wird diesen Fragen weiter nachgegangen.

6.2 Beobachtung von Meteoroidenspuren mit dem Doppellidar

Bei der Auswertung der Daten des IAP-Doppellidars fielen immer wieder kurzzeitige Dichteanstiege auf, die meist nur für wenige Sekunden und nur in einem Höhenkanal (200 m) sichtbar waren. Aufgrund ihrer zu geringen zeitlichen und vertikalen Ausdehnung sind diese „Ca-Wolken“ keine sporadischen Schichten, wie sie im Kap. 5 besprochen wurden. In Abb. 6.3 ist links ein Zählratenanstieg in 97,2 km Höhe am 25. September 1997 gegen 23:50 UT vor dem Hintergrund der Zählrate aus der permanenten Schicht zu sehen. Zur Verbesserung der Statistik wurden hier 60 Pulse (entsprechend 4 s) gemittelt. In der rechten Figur ist die Überhöhung des Signals gegenüber dem Hintergrundsignal in seiner zeitlichen Entwicklung dargestellt. Man erkennt, daß nur 2 Höhenkanäle (je 200 m) von diesem ca. 35 s langen Ereignis betroffen sind.

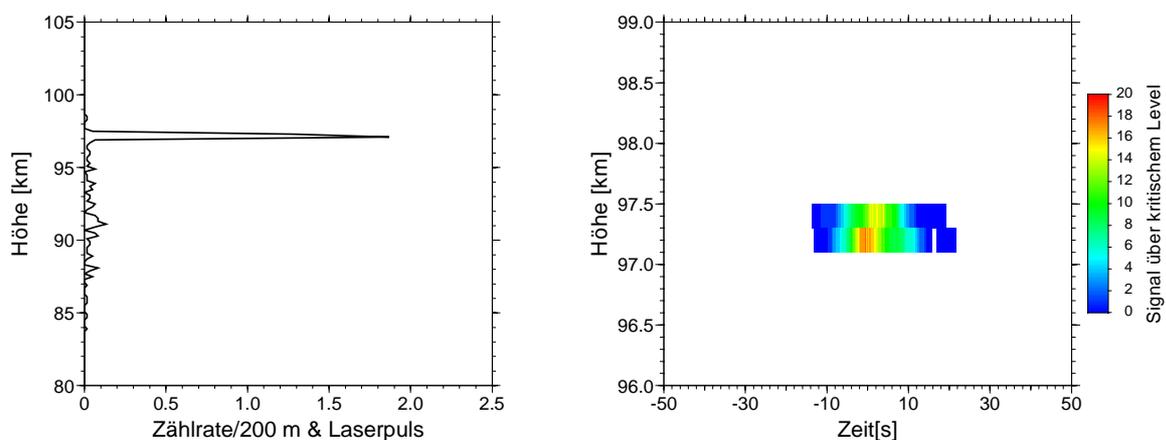


Abb. 6.3: Rückstreuprofil des Ca-Lidars um 23:50:05 UT (25./26. September 1997) nach Mittelung über 60 Pulse (links) und farbcodierte Darstellung der Überhöhung des Ca-Signals über das Signal der permanenten Metallschicht, die Zeitachse ist um den Zeitpunkt 23:50:05 UT zentriert (rechts).

Im hier dargestellten Ereignis wurde die Spur eines verdampfenden Meteoroiden beobachtet, die vom Wind durch das Sichtfeld des Lidars geblasen wurde [Höffner *et al.*, 1999; Gerding *et al.*, 1999b; von Zahn *et al.*, 1999]. Beim Eintreten des Meteoroiden in die Atmosphäre bildet sich ein Schlauch aus verdampftem Material (Abb. 6.4), der abhängig von der Lebensdauer der einzelnen Bestandteile und der Verdünnung durch turbulente und molekulare Diffusion zwischen mehreren Minuten und rund einer halben Stunde bestehen bleibt. Die für

das Verdampfen von Metallen notwendigen Temperaturen von meist mehr als 1000 K [Kerridge und Matthews, 1988] werden in der Regel nur innerhalb von rund einer Flugsekunde erreicht, bevor die Meteoroiden vollständig verdampft oder aufgrund des Massenverlustes abgekühlt sind [Love und Brownlee, 1991]. Typischerweise erreichen die interplanetaren Staubteilchen diese Temperatur in rund 90 km Höhe, wobei der genaue Temperaturverlauf vom Eintrittswinkel des Partikels, seiner Größe und Geschwindigkeit abhängig ist. Die gesamte beim Eintritt durchflogene Luftsäule entspricht dem ein- bis zweifachen der Masse des Meteoroiden selbst [Brownlee, 1985]. Insgesamt wird deutlich, daß das Phänomen des verdampfenden Meteoroiden eng mit der Leuchterscheinung eines *Meteor*s zusammenhängt. Im folgenden wird darum meist einfach von *Meteor*spuren gesprochen, auch wenn die (nicht mehr leuchtende) Ablagerungsspur des Teilchens gemeint ist.

Die Meteorspur ist im Lidar bei einem Strahldurchmesser von 40-50 m und einer typischen Windgeschwindigkeit in der Mesopausenregion von 15 m/s [Fleming et al., 1990] meist für mehrere Sekunden, bei sehr breiten Spuren auch deutlich länger sichtbar. Eine genaue Analyse erfordert also eine hohe Zeitauflösung des Lidars im Sekundenbereich, allerdings wurden auch bei längeren Integrationszeiten bereits Meteorspuren entdeckt (vgl. Anhang B.2 und Beatty et al. [1988], She et al. [1991], Kane und Gardner [1993a]).

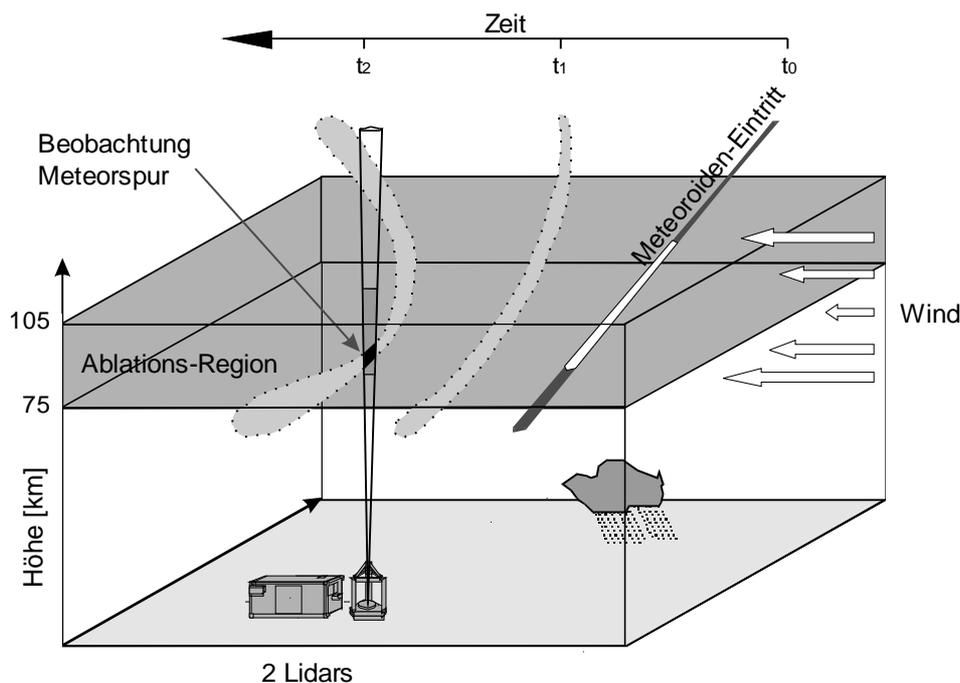


Abb. 6.4: Beobachtung der vom Wind verblasenen Ablagerungsspur eines verdampften Meteoroiden mit dem IAP-Doppellidar [von Zahn et al., 1999]

6.2.1 Automatische Erkennung von Meteoroidenspuren

Innerhalb einer 10-h-Meßnacht nimmt das Doppellidar rund eine Million einzelne Rückstreuprofile auf. Das Durchsuchen dieser Profile auf Meteorspuren ist nur noch mit automatisierten Auswerte-Algorithmen möglich. Am IAP wurde dazu eine Software entwickelt, die die Rückstreuprofile auf Grundlage einer Poisson-Statistik auswertet [Höffner et al., 1999]. In

einem ersten Lauf ermittelt die Software eine höhenabhängige Statistik der Häufigkeiten der einzelnen, in einem Höhenkanal auftretenden Zählraten. Abbildung 6.5 stellt die so erhaltenen Statistiken aus der Metallschicht (hohe Zählrate, Figur links) und aus dem Signaluntergrund (geringere Zählrate, Figur Mitte) gegenüber. Diejenigen Zählraten, die in einer Höhe nur noch in einem von 100 Pulsen erreicht werden, bilden danach eine erste Schwelle, den sog. *kritischen Level*, der um den Faktor 1,5 erhöht wird, um die Qualität der Auswertung zu erhöhen (*Meteor-Level*). Die rechte Figur in Abb. 6.5 zeigt die Statistik eines Höhenkanals, der auch die hohen Zählraten einer Meteorspur enthält.

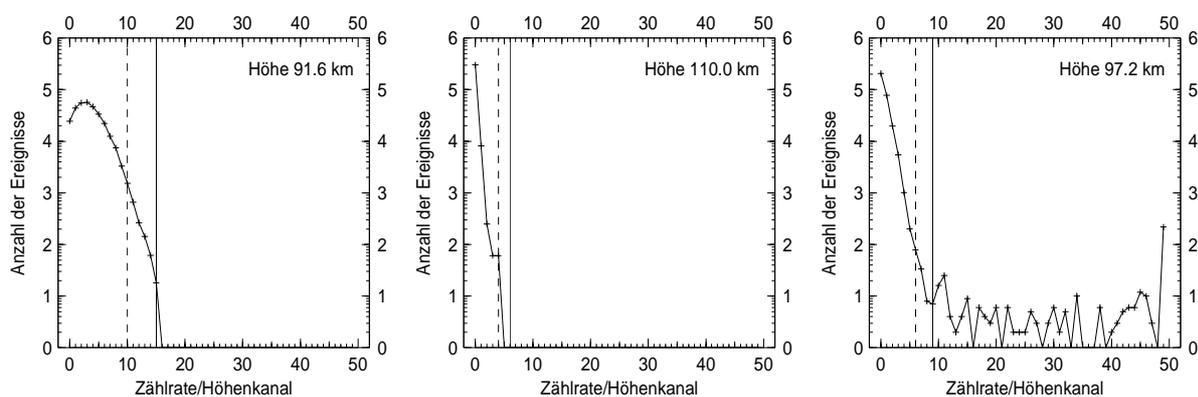


Abb. 6.5: Logarithmisch dargestellte Zählratenstatistik der Nacht 25./26.9.1997 aus dem Maximum der Metallschicht (links), aus dem Signaluntergrund (Mitte) und aus einem Höhenkanal mit einer Meteorspur (rechts). Die senkrechte gestrichelte Linie markiert den kritischen Level, die durchgezogene den Meteor-Level.

In einem zweiten Suchlauf überprüft die Software, in welchen Profilen und welchen Höhenkanälen dieser *Meteor-Level* überschritten wurde. Um Fehlerkennungen aufgrund statistischer Signalschwankungen zu vermeiden (vgl. Abb. 6.5 links), wurden weitere Kriterien implementiert, die die Wahrscheinlichkeit für die Erkennung einer zufälligen Zählrate als Meteorspur auf weniger als 10^{-6} reduzieren. U.a. werden in beiden Suchläufen die Rückstreuprofile zunächst über 60 Pulse oder 4 s gemittelt. Dies entspricht in etwa der Mindestzeit, die eine Meteorspur zum Durchdriften des Lidarsichtfeldes benötigt. Bei Bedarf können auch kürzere Mittelungen verwendet werden. Wird tatsächlich eine Überschreitung des *Meteor-Levels* erkannt, wertet die Software alle zeitlich benachbarten Pulse oberhalb des *kritischen Levels* als Meteorspur.

Innerhalb des Berichtszeitraums wurden mit dem Ca-Lidar insgesamt 654 Meteorspuren mit Längen zwischen einer und mehreren hundert Sekunden beobachtet. Insgesamt ergibt dies eine Rate von 1,3 Spuren pro Stunde, die typische Länge lag bei 4 bis 30 Sekunden. Das in einem Teil der Nächte betriebene Fe-Lidar erfaßte 91 Meteore ($0,9 \text{ h}^{-1}$), das Ca^+ -Lidar 58 Meteore ($0,2 \text{ h}^{-1}$). In Abb. 6.6 ist das Häufigkeitsprofil der Spuren dargestellt, Ca- und Fe-Verteilung zeigen jeweils ein deutliches Maximum bei 87 km bzw. 83 km. Die Abbildung soll an dieser Stelle nur einen Eindruck von der Höhenverteilung der erkannten Meteorspuren vermitteln, das K-Profil [J. Höffner, persönliche Mitteilung] ist zum Vergleich eingezeichnet. Die Abb. 6.6 wird im Abschnitt 6.4.1 weiter diskutiert.

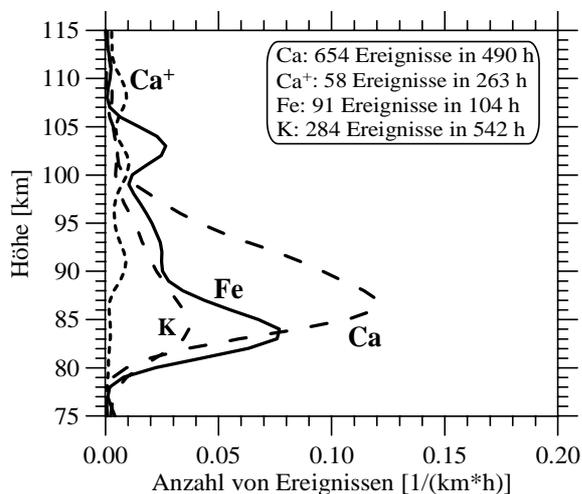


Abb. 6.6: Häufigkeitsprofil der Ablagerungsspuren von Meteoroiden: Ca (lang gestrichelt), Ca⁺ (gepunktet), Fe (durchgezogen) und K (mittellang gestrichelt). Die Profile sind über 7 km geglättet.

6.2.2 Beispiele für die Beobachtung einzelner Spuren

An der Meteorrate erkennt man, daß Ca-Meteorspuren im Mittel ca. 1,5-mal häufiger beobachtet wurden als Fe-Spuren. Eine Fe-Signatur fehlte jedoch in weit mehr als einem Drittel der Ca-Spuren. Abbildung 6.7 (links) zeigt ein typisches Beispiel eines solchen Ereignisses am 25./26. April 1997 in 86,8 km Höhe. Das Ca-Rückstreuprofil ist über 4 Sekunden um das Maximum der Meteorspur gemittelt. Daneben ist das Rückstreuprofil des Fe-Lidars für den gleichen Zeitpunkt dargestellt. Um das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis weiter zu verbessern, erfolgte hier die Mittelung mit 6 s über annähernd die gesamte Dauer des Ca-Ereignisses. Man erkennt ausschließlich das Signal aus der permanenten Fe-Schicht. Die Beobachtungsvolumina beider Lidars sind exakt identisch.

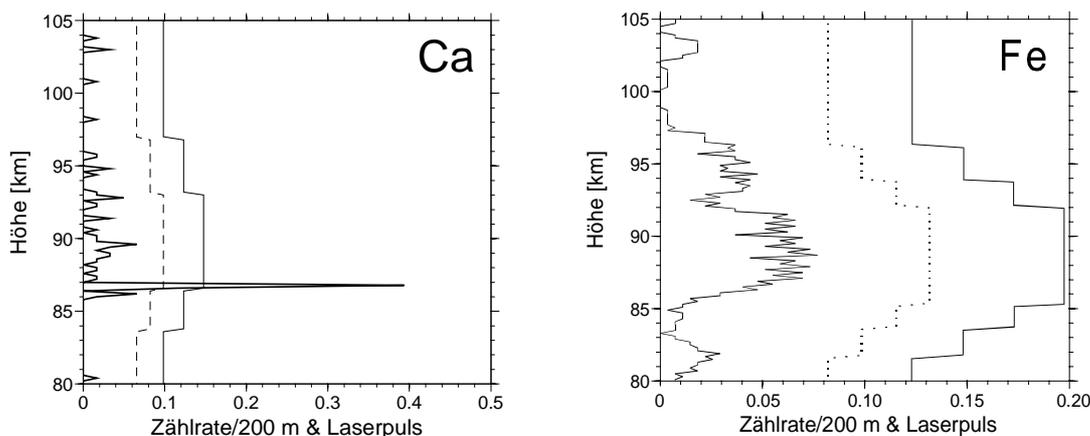


Abb. 6.7: links: Rückstreuprofil des Ca-Lidars mit einer Meteorspur in 86,8 km Höhe um 01:13:53 UT am 25./26. April 1997 (Dauer: 7 s, Mittelung: 4 s); rechts: Rückstreuprofil des Fe-Lidars um 01:13:53 UT (Mittelung: 6 s). Der *kritische Level* des Suchalgorithmus ist gestrichelt, der *Meteor-Level* durchgezogen eingezeichnet.

Die größere Zahl von Ca-Meteorspuren ist jedoch nicht nur auf eine größere Empfindlichkeit des Ca-Lidars zurückzuführen. So wurden auch Meteorspuren im Fe-Lidar ohne eine Entsprechung in den Ca-Daten beobachtet. Abbildung 6.8 (rechts) zeigt hierfür ein Beispiel vom 27./28. September 1997 mit einer 20 s langen Meteorspur in 97,8 km Höhe. Die rund um

das Signalmaximum um 4:01:30 UT über 8 s gemittelten Ca-Daten zeigen keine signifikante Erhöhung der Zählrate.

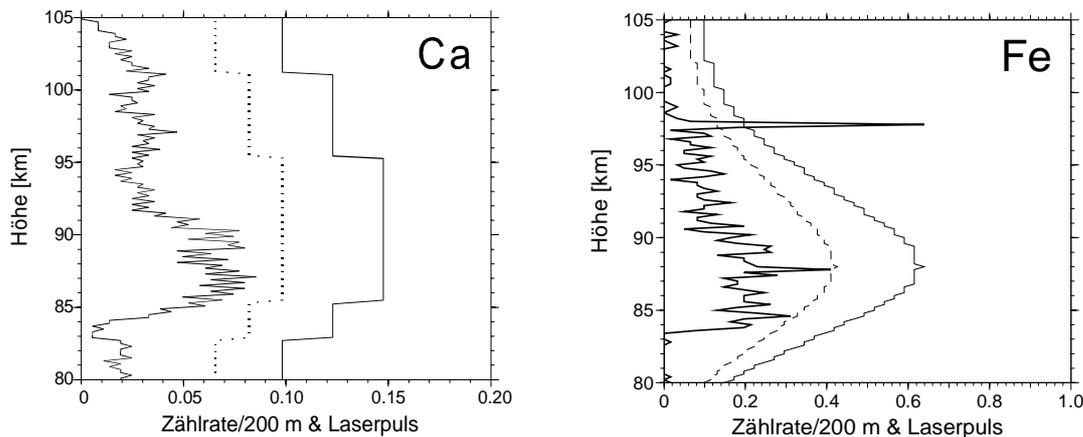


Abb. 6.8: links: Rückstreuprofil des Ca-Lidars um 4:01:30 UT am 27./28. September 1997 (Mittelung 8 s); rechts Rückstreuprofil des Fe-Lidars mit einer Meteorspur in 97,8 km Höhe um 4:01:30 UT (Beginn 4:01:25 UT, Ende: 4:01:45 UT, Mittelung: 4 s). Der *kritische Level* des Suchalgorithmus ist gestrichelt, der *Meteor-Level* durchgezogen eingezeichnet.

6.2.3 Simultane Ca- und Fe-Spuren

Nur in wenigen Fällen wurden tatsächlich zeitgleich in beiden Lidars Meteorspuren beobachtet. In 93 h paralleler Sondierung von Ca- und Fe-Lidar wurden insgesamt 201 Ca- und 79 Fe-Spuren gezählt. Unter diesen waren aber nur 12 *gemeinsame*, deutliche Spuren zu erkennen. In den anderen Fällen war die Spur in mindestens einem Lidar sehr schwach ausgebildet oder unterhalb der Signifikanzschwelle.

Während der Nacht 16./17. November 1998 wurden drei simultane Meteorspuren detektiert. In dieser Nacht erreichte der *Leoniden*-Meteorschauer ca. 4 h nach dem wetterbedingten Ende der Lidar-Sondierungen sein Maximum. Abbildung 6.9 zeigt ein Beispiel für eine simultane Ca/Fe-Spur. Die Ablagerungsspur driftete in 97,8 km Höhe innerhalb von 25 s durch das gemeinsame Sichtfeld von Ca- und Fe-Lidar. Der untere Teil der Abbildung stellt den zeitlichen Verlauf des Meteorsignals mit 7,5 m Höhenauflösung dar. Aus beiden Bildreihen erkennt man die geringere Überhöhung des Fe-Meteorsignals gegenüber der Zählrate aus der permanenten Metallschicht (vor allem unterhalb der Spur erkennbar). Gerade weil gleichzeitige Fe/Ca-Meteorspuren sehr selten sind, ist es bemerkenswert, daß der Zeitverlauf der Signale in beiden Lidars im Rahmen der statistischen Grenzen sehr ähnlich ist.

Die in beiden Lidars stärkste Meteorspur wurde in der Nacht 26./27. Oktober 1997 um 4:52 UT in 89,8 km Höhe beobachtet. Die Spur erzeugte im Ca-Lidar eine rund hundertmal so hohe Zählrate wie im Maximum der permanenten Schicht zu diesem Zeitpunkt und eine 80fache Überhöhung gegenüber dem *kritischen Level*. Abb. 6.10 zeigt die farbcodierte Darstellung der gesamten Spur mit 200 m Höhenauflösung. Der höher auflösende Zähler war zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betrieb. Man erkennt, daß die hohe Zählrate nur von einer über ca. 50 s detektierten Wolke mit einer Halbwertsbreite von weniger als 200 m erzeugt wird. An-

schließend wurde für mehrere Minuten ein ausgedehnter „Schwanz“ der Meteorspur beobachtet. Das gleichzeitig betriebene Kalium-Lidar hat die Spur ebenfalls in dieser Höhe und mit dem gleichen Zeitverlauf detektiert [J. Höffner, persönliche Mitteilung]. Die Ursache dieses ungewöhnlichen Zeitverlaufs ist unklar.

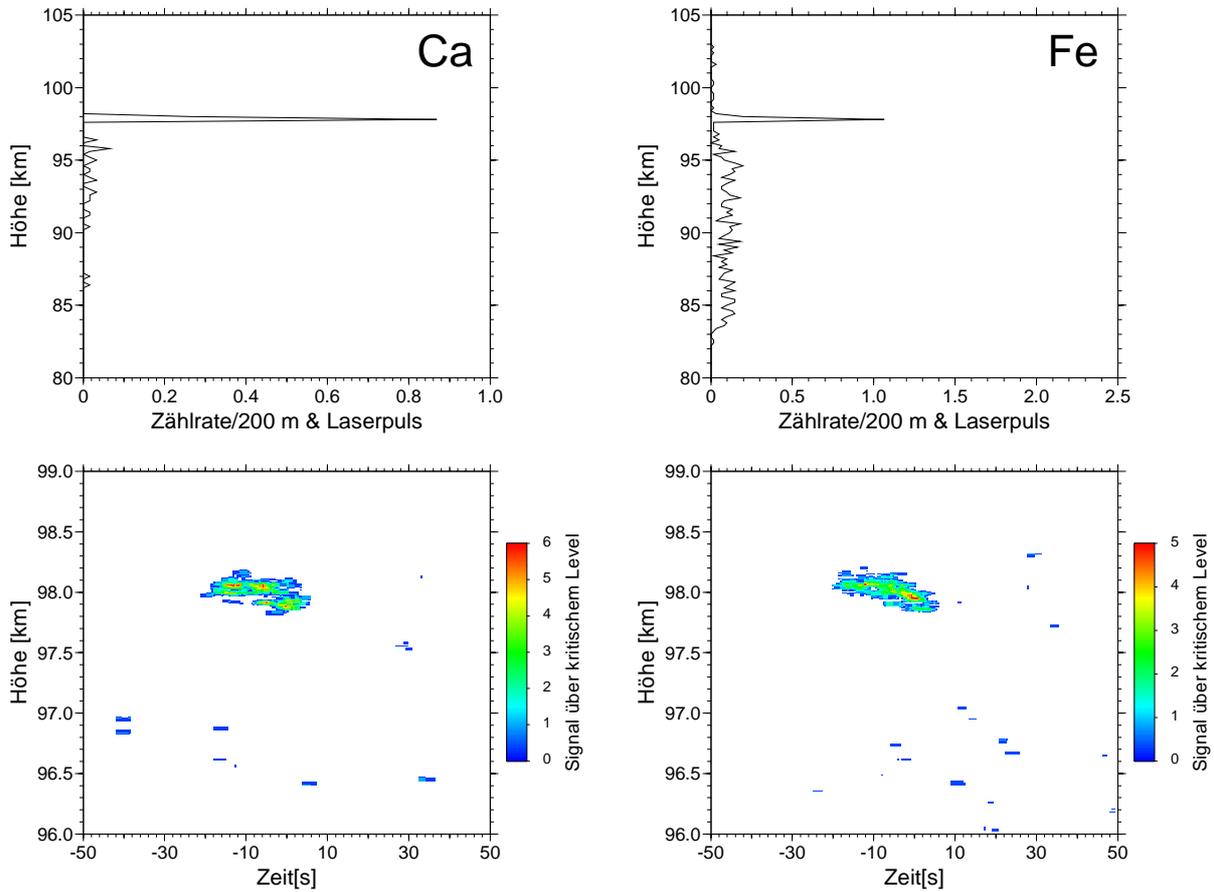


Abb. 6.9: Gleichzeitige Ca- und Fe-Meteorspur, aufgenommen in der Meßnacht 16./17. November 1998 um 23:07 UT (links: Ca; rechts: Fe). Oben: Höhenprofil der Zählrate im Signal-Maximum; unten: zeitliche Entwicklung des Meteorsignals mit 7,5 m Höhengauflösung.

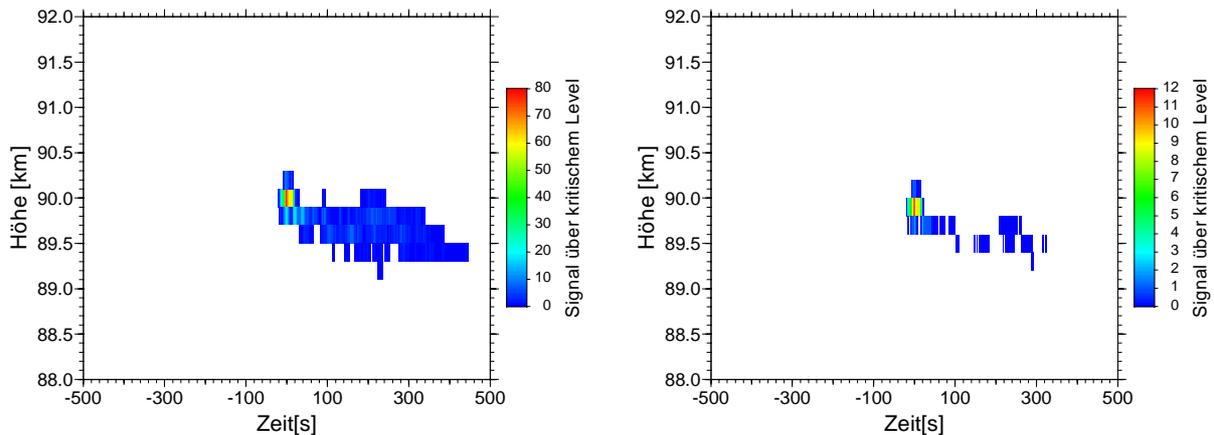


Abb. 6.10: Zeitliche Entwicklung der stärksten beobachteten Ca- und Fe-Meteorspur, aufgenommen in der Meßnacht 26./27. Oktober 1997 um 4:52 UT (links: Ca; rechts Fe).

6.2.4 Simultane Ca- und Ca⁺-Spuren

Mit dem IAP-Doppellidar konnten Ca⁺-Ionen in Meteorspuren nachgewiesen werden. Bei der simultanen Sondierung von Ca und Ca⁺ wurden dabei die Ca-Ereignisse häufiger beobachtet als ionisierte Spuren: In 263 h paralleler Sondierung wurden 349 Ca- und 58 Ca⁺-Meteor-Ereignisse registriert. Dieses Ungleichgewicht kann z.T. mit der geringeren Empfindlichkeit des Ca⁺-Lidars erklärt werden, die sich aus atomphysikalischen Parametern (siehe Anhang A) und der Laserleistung (vgl. Abschnitt 2.2) ergibt, jedoch wurden oftmals auch zu starken Ca-Ereignissen keine Ca⁺-Signaturen gefunden. Insgesamt wurden im Berichtszeitraum 16 gemeinsame Ereignisse gefunden. Oftmals war die Stärke der Ca⁺-Spuren jedoch so gering, daß sie nur aufgrund einer empfindlicheren Suche und der Gleichzeitigkeit eines Ca-Ereignisses gefunden wurden. Da die gleichzeitige Beobachtung zufällig erhöhter Zählraten in zwei unabhängigen Lidars unwahrscheinlich ist, wurde die Tatsache der Gleichzeitigkeit als zusätzliches Signifikanzkriterium für die Ca⁺-Spur herangezogen.

In Abb. 6.11 sind die Rückstreupprofile einer gemeinsamen Meteorspur in 97,6 km Höhe dargestellt, die am 25. September 1997 um 3:15 UT aufgenommen wurde. In dieser Höhe werden i.a. nur wenige Ca-Spuren detektiert (vgl. Abb. 6.6). Beide Abbildungen zeigen das über 60 Pulse (4 s) um das Spurmaximum gemittelte Rückstreupprofil.

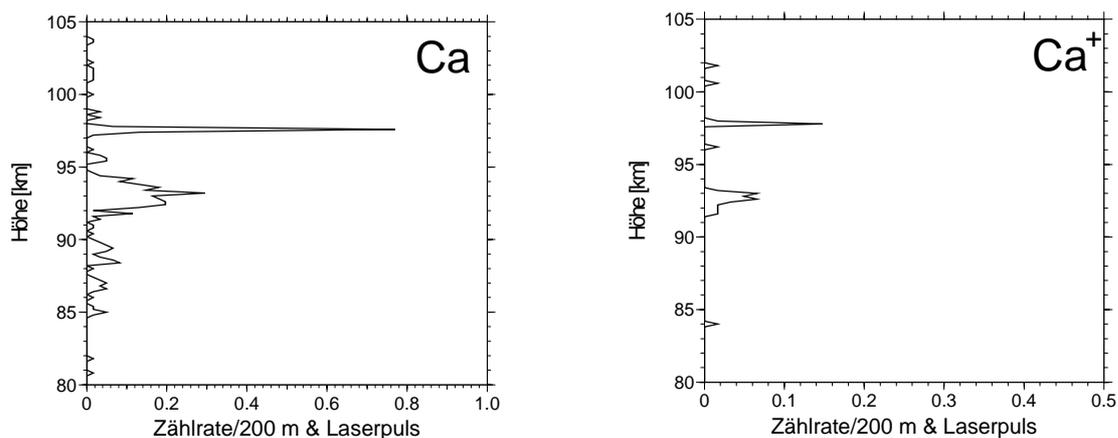


Abb. 6.11: Gemeinsame Ca/Ca⁺-Meteorspur vom 25. September 1997 um 3:14:43

6.2.5 Berechnung von Metallkonzentrationen in Meteoroidenspuren

Wie im Kap. 2 ausgeführt wurde, erfolgt die Berechnung der Metalldichte in einem Höhenkanal des Lidar-Rückstreuprofiles durch die Normierung des Resonanzsignals aus der Metallschicht auf das Rayleighsignal aus 30 km Höhe (Gleichung 2.5). Das gleiche Verfahren läßt sich auch auf die nur über 4 s gemittelten Rückstreuprofile einer Meteorspur anwenden. Das Hauptproblem stellt dabei die schlechte Statistik aufgrund der geringen Zählrate in der Normierungshöhe dar. Bei der üblichen Dichteberechnung wird der Effekt durch Integration über ca. 2 min bzw. 2000 Laserpulse reduziert. In Meteorspuren ist dies aufgrund der Kürze des Signals nicht möglich.

Man kann sich jedoch hier die Berechnungen aus den integrierten Profilen zu Nutze machen: Aus den integrierten Profilen erhält man die *Empfindlichkeit* S des Lidars zu einem bestimmten Zeitpunkt t für die Höhe r [Gerding et al., 1999]:

$$S_i(r, t) = \frac{c(t)}{n \cdot r \cdot P} \quad (6.1)$$

Dabei ist $c(t)$ die Zählrate des Lidars nach P Laserpulsen (typisch $P=2000$) und n die daraus berechnete Teilchenzahldichte [cm^{-3}]. Da die Zählrate in der Meteorhöhe r betrachtet wird, ist die Lidar-Empfindlichkeit $S(r)$ automatisch entfernungskorrigiert (sog. r^2 -Korrektur, vgl. Abschnitt 2.5). S schwankt im Verlauf der Nacht aufgrund von Änderungen der atmosphärischen Transmission oder der Effizienz der Laserfarbstoffe häufig um einen Faktor 4 oder mehr, ist jedoch innerhalb einer Integrationsperiode relativ konstant.

Für die Berechnung der Teilchenzahldichte eines Metalls in einer Meteorspur wurde darum zunächst die Empfindlichkeit des Lidars zu diesem Zeitpunkt für die Höhe der Meteorspur berechnet. Anschließend wurde von der gesamten Zählrate c_g im Maximum die Zählrate c_s der Hintergrundschicht abgezogen. Die verbleibende Zählrate c_M der Meteorspur führt dann zu der Teilchenzahldichte n_M des Metalls innerhalb der Spur:

$$c_M = c_g - c_s \quad \Rightarrow \quad n_M = S(r, t) \cdot c_M \quad (6.2)$$

In der Tab. 6.2 sind die Teilchenzahldichten für die zwölf simultan detektierten Ca/Fe-Meteorspuren aufgelistet. Alle Berechnungen beziehen sich dabei auf eine Höhenauflösung von 200 m. Da alle Spuren eine Halbwertsbreite um 200 m oder weniger besaßen, stellt die Teilchenzahldichte n_M einen Mittelwert über diesen Höhenbereich dar. Im Zentrum der Spur können sehr viel größere Dichten vorliegen. Neben den Eigenschaften wie Uhrzeit t und Höhe r einer Beobachtung zeigt die letzte Spalte das Verhältnis von Ca- zu Fe-Dichten. Die Zählraten c_M dienen hier nur als Maß für die Stärke einer Spur.

Obwohl neben der Gleichzeitigkeit der Ereignisse nur die Stärke einer Spur ausschlaggebend für ihre Aufnahme in die Liste war – das Signal mußte für die Erkennung und die Berechnung einer Dichte ausreichen – erkennt man eine zeitliche Gruppierung der einzelnen Ereignisse:

- Ein Viertel der gemeinsamen Meteorspuren wurde im August 1997 gefunden. In diesen Zeitraum fielen gleichzeitig eine Schönwetterperiode und das Maximum des Meteorsehers der Perseiden. Die Häufung ist also vor allem auf das Meßregime zurückzuführen.
- Drei gemeinsame Ereignisse wurden am 27. Oktober 1997 innerhalb von 12 min detektiert. Bei den Ereignissen Nr. 7, 8 und 9 handelt es sich wahrscheinlich um eine einzelne Verdampfungsspur, die aufgrund des Windfeldes verkrümmt wurde und nachfolgend in verschiedenen Höhen zu verschiedenen Zeiten das Lidarsichtfeld kreuzte. Nr. 8 ist das mit Abstand stärkste Ereignis in beiden Geräten („Feuerkugel“). Für die 12 Ereignisse sind somit nur 10 Meteoroiden verantwortlich.

- Drei Ereignisse am 16./17. November 1998 wurden während des Meteorschauers der Leoniden und nur ca. 4 Stunden vor seinem Maximum detektiert. Die Häufung kann hier auf den Einfall von Meteoroiden mit ähnlichen Eigenschaften (Eintrittswinkel, Geschwindigkeit, Dichte) zurückgeführt werden.
- Neben den besonderen Ereignissen der Feuerkugel (Nr. 7 bis 9) erfolgen 7 der restlichen 9 Ereignissen während Schauern sehr schneller Meteoroiden (*Perseiden* und *Leoniden*).

Tab. 6.2: Metallkonzentration in 12 simultanen Sondierungen einer Meteorspur im Ca- und Fe-Lidar. Die Werte stellen die mittlere Konzentration pro Höhenkanal im Maximum des Signals dar. Die Fehlergrenzen des Metallverhältnisses ergeben sich aus dem Fehler der einzelnen Konzentrationen aufgrund statistischer Signalschwankungen. Die Mittelwerte sind mit ihrer Standardabweichung angegeben.

#	Datum	t [UT]	r [km]	c_M (Ca)	n_M (Ca) [cm ⁻³]	c_M (Fe)	n_M (Fe) [cm ⁻³]	n_M (Ca) / n_M (Fe) [10 ⁻²]
1	13.05.1997	1:17	89,2	3,2	3700	0,43	216000	1,7 ± 0,5
2	05.08.1997	22:45	91,6	0,31	470	0,22	191000	0,2 ± 0,2
3	10.08.1997	1:31	97,8	0,94	1300	0,12	89000	1,5 ± 1,2
4	12.08.1997	1:33	96,8	1,1	1400	0,08	52000	2,7 ± 2,9
5	12.08.1997	2:20	90,0	0,44	560	0,16	106000	0,5 ± 0,4
6	25.09.1997	23:50	97,2	1,7	1900	0,44	123000	1,5 ± 0,5
7	27.10.1997	4:45	103,4	0,26	340	0,16	27000	1,3 ± 1,1
8	27.10.1997	4:53	89,8	10	9900	5,2	637000	1,6 ± 0,2
9	27.10.1997	4:57	85,0	1,9	1700	1,3	146000	1,2 ± 0,3
10	16.11.1998	22:55	97,6	0,37	510	0,29	65000	0,8 ± 0,5
11	16.11.1998	23:07	97,8	0,86	1800	1,1	241000	0,7 ± 0,2
12	17.11.1998	0:16	103,4	0,49	860	0,75	206000	0,4 ± 0,2
Mittelwert			95,0		2000		175000	1,2 ± 0,7
Mittelwert (ohne 16./17.11.98)			93,0		2400		176000	1,4 ± 0,7

Daneben fällt das im Rahmen der statistischen Genauigkeit sehr ähnliche Ca/Fe-Verhältnis n_M (Ca) / n_M (Fe) auf. In den Ereignissen 1-9 werden wesentliche Abweichungen meist nur bei geringer Signalstärke mindestens eines Lidars beobachtet (z.B. Spur 2 und 4). Die innerhalb einer Nacht gemessenen Ereignisse 10-12 bilden in Bezug auf das Ca/Fe-Verhältnis scheinbar eine eigene Gruppe mit Werten, die nur rund die Hälfte des Mittels der übrigen Werte betragen. Aus verschiedenen Gründen hätte man aber eine größere Streuung der Ca/Fe-Verhältnisse n_M (Ca) / n_M (Fe) erwarten können: a) Der Verdampfungsprozeß wird von der Temperatur, diese wiederum (u.a.) von der momentanen Höhe des Meteoroiden gesteuert.

Trotzdem verursachen unterschiedliche Verdampfungshöhen ähnliche Ergebnisse. b) Das Alter der jeweiligen Spuren und damit die mögliche Zeit für metallspezifische chemische Reaktionen ist den gezeigten Daten nicht zu entnehmen. c) Aufgrund der typischen Zusammensetzung von Meteoroiden und den häufigen Beobachtungen von Meteorspuren in nur einem Lidar konnte man verschiedene Ca/Fe-Verhältnisse zwischen reinen Ca-Spuren und reinen Fe-Spuren erwarten.

Da Ca^+ -Ionenspuren im Lidar meistens nur sehr schwach zu erkennen waren, konnte nur zu fünf der 16 simultanen Ca/Ca⁺-Ereignissen die Metalldichte ausgerechnet werden. Das Verfahren ist identisch zu dem oben für Ca/Fe-Spuren genannten. Tab. 6.3 listet die verschiedenen Werte auf. Die mittlere Höhe der gemeinsamen Ca/Ca⁺-Ereignisse liegt mit 92,4 km deutlich unter der Höhe von Ca/Fe-Ereignissen. Betrachtet man alle 16 Ca/Ca⁺-Ereignisse, findet man die mittlere Höhe sogar bei 91,4 km. Zu beachten ist außerdem, daß die mittlere Ca-Konzentration in einer Ca/Ca⁺-Spur nur rund ein Drittel der Ca-Dichte gemeinsamer Ca- und Fe-Spuren beträgt, die Summe aus Ca und Ca⁺ aber der Ca-Konzentration in Ca/Fe-Spuren entspricht. Simultane Ca/Ca⁺-Spuren findet man nahezu gleichmäßig über den gesamten Höhenbereich, in dem auch einzelne Spuren detektiert werden (vgl. Abb. 6.6).

Tab. 6.3: Metallkonzentration in fünf simultanen Sondierungen einer Meteorspur im Ca- und Ca⁺-Lidar. Zur Erläuterung siehe Tab. 6.2.

#	Datum	t [UT]	r [km]	c_M (Ca)	n_M (Ca) [cm ⁻³]	c_M (Ca ⁺)	n_M (Ca ⁺) [cm ⁻³]	n_M (Ca) / n_M (Ca ⁺)
1	23.04.1997	2:18	89,8	1,1	970	0,27	1040	$0,9 \pm 0,5$
2	25.09.1997	3:15	97,6	0,74	680	0,14	740	$0,9 \pm 0,7$
3	03.11.1997	23:46	94,4	1,13	860	0,37	2130	$0,4 \pm 0,2$
4	08.12.1998	19:17	85,8	0,53	370	0,13	620	$0,6 \pm 0,5$
5	09.12.1998	5:22	94,2	0,23	560	0,24	3920	$0,1 \pm 0,1$
	Mittelwert		92,4		690		1690	$0,6 \pm 0,3$

6.3 Interpretation der Lidar-Beobachtungen

Mit dem Metall-Doppellidar des IAP konnten erstmalig die Konzentrationen von Calcium und Eisen bzw. von Ca und Ca⁺ in den Verdampfungsspuren von Meteoroiden mit dem Lidar simultan im selben Volumen gemessen und miteinander verglichen werden (Tab. 6.2 und 6.3). Die daraus abgeleiteten Ergebnisse sollen im folgenden vorgestellt und diskutiert werden [Gerding *et al.*, 1999a]. Vergleiche der Sondierungen von Meteorspuren mit dem Ca-Lidar und dem ebenfalls am IAP eingesetzten K-Lidar wurden von Gerding *et al.* [1999b] und von von Zahn *et al.* [1999] veröffentlicht.

6.3.1 Gleichzeitige Sondierung von Fe- und Ca-Ereignissen

Bereits mehrfach wurde die *Abreicherung*⁴ der mesosphärischen Ca-Schicht im Vergleich zu CI-Chondriten erwähnt, wenn man zum Vergleich die Fe-Werte heranzieht. Ein kurzzeitiger Metalleintrag durch einen verdampfenden CI-Chondriten fällt also in der Ca-Schicht stärker ins Gewicht als bei Fe. Das Ca-Lidar besitzt demnach eine größere Empfindlichkeit für Verdampfungsspuren von Meteoroiden, sofern man zunächst das gleichmäßige Verdampfen aller Metalle im Meteoroiden annimmt. Die geringere, dem Rückstreuquerschnitt und der Metallkonzentration proportionale Signalstärke des Ca-Lidars gleicht diesen Vorteil nicht vollständig aus. Hierzu paßt die häufigere Beobachtung von Ca-Spuren gegenüber Fe-Spuren im gleichen Meßzeitraum. In diese Argumentation paßt aber nicht die – wenn auch seltene – Beobachtung reiner Fe-Spuren.

Was bedeutet dies für die Metallverhältnisse in Meteoroiden und das Verdampfungsverhalten? Betrachtet man nur die in Tab. 6.2 genannte Auswahl von Ereignissen, so zeigt sich ein relativ konstantes Ca/Fe-Verhältnis. Dieses konstante Verhältnis spricht einerseits für konstante Metallverhältnisse in den Meteoroiden vor dem Verdampfen, andererseits für das gleichzeitige Verdampfen zumindest von Fe und Ca, obwohl diese sehr unterschiedliche Siedepunkte besitzen. Dabei ist jedoch bemerkenswert, daß das gemessene Ca/Fe-Verhältnis mit ca. 0,012 ungefähr um den Faktor 6 von der CI-Zusammensetzung ($[Ca]/[Fe]=0,068$) abweicht. Hierfür sind verschiedene Erklärungen möglich:

- Das chemische Gleichgewicht zwischen Metallen und metallhaltigen Molekülen wird sehr schnell hergestellt, so daß man in den Spuren einen Ca/Fe-Wert zwischen chondritischen und atmosphärischen Verhältnissen mißt. Dagegen spricht die fehlende Höhenabhängigkeit des Ca/Fe-Verhältnisses aufgrund unterschiedlicher Reaktionsgeschwindigkeiten. Die zentrale Frage dieses Kapitels nach der großen Differenz zwischen atmosphärischen und chondritischen Metallverhältnissen wird nicht beantwortet (vgl. Tab. 6.1).
- Das Metallverhältnis in den Meteoroiden entspricht vor dem Verdampfen nicht der CI-Zusammensetzung. Dies erscheint jedoch angesichts der experimentellen Ergebnisse unwahrscheinlich [Notsu et al., 1978; Brownlee et al., 1997]. Es gibt keinen Grund, die bevorzugte Sondierung von Meteoroiden anderer, seltenerer Klassen anzunehmen.
- Aus den Meteoroiden verdampfen nicht nur Metall-Atome, sondern auch verschiedene Metall-Moleküle in unterschiedlichen Atom-Molekül-Verhältnissen. Dafür spricht, daß die Metalle in Meteoroiden in der Regel in mineralischer Form u.a. zusammen mit Sauerstoff vorliegen [Harvey, 1973], ein geschmolzener Meteoroid also verschiedene metallische und nicht-metallische Bestandteile in der Schmelze enthält. Für das Lidar sind jedoch nur die atomaren Bestandteile der Verdampfungspur sichtbar. Dieser Erklärung wird im folgenden Abschnitt 6.3.2 näher nachgegangen.

⁴ Der Begriff *Abreicherung* beschreibt hier die Beobachtung einer geringeren Metaldichte in der Atmosphäre im Vergleich zu der Dichte, die man aus dem Vergleich mit anderen Metallen und ihrer gemeinsamen meteoroidischen Quelle erwarten kann.

Obwohl nur die Gleichzeitigkeit der Ereignisse in den beiden Lidars als Kriterium für die Auswahl der Spuren in Tab. 6.2 gewählt wurde, liegen die Beobachtungshöhen im Mittel ca. 8 km (Ca) bzw. 11 km (Fe) höher als die mittleren Höhen aller beobachteten Verdampfungsspuren. Die Ereignisse des 16./17.11.1998 bilden dabei eine eigene Gruppe mit einer im Mittel um 6,6 km größeren Verdampfungshöhe im Vergleich zu den übrigen gemeinsamen Spuren. Die größere Beobachtungshöhe zeigt, daß vor allem aus überdurchschnittlich schnellen und relativ großen Meteoroiden gleichzeitig Ca und Fe verdampft. Dies wird durch die Häufung gleichzeitiger Ca/Fe-Ereignisse während Meteorschauern bestätigt.

6.3.2 Modelle zum Verdampfungsverhalten der neutralen Metalle

Bei theoretischen Betrachtungen der mesosphärischen Metallschicht nimmt man im allgemeinen an, daß die Metalle entsprechend ihrem Atomdichte-Anteil *homogen* aus Meteoroiden *abladieren* [Plane, 1991]. Dies bedeutet, daß Meteoroiden gleichmäßig von außen nach innen aufschmelzen und atomare Metalle in konstanten Anteilen aus der Schmelze verdampfen oder aufgrund der hohen Geschwindigkeiten mechanisch „weggeblasen“ werden (Abb. 6.12, links). Love und Brownlee [1991] haben berechnet, daß sich in Meteoroiden größer als 1 mm im Durchmesser ein Temperaturgradient ausbildet. Da andererseits chemische Abbauprozesse die unterschiedlichen Anteile von Metallen und Metall-Ionen in der Atmosphäre und in CI-Chondriten [Kopp, 1997] nicht vollständig erklären können, müssen in die Modelle willkürliche *Verdampfungseffektivitäten* als variable Parameter eingefügt werden (vgl. Kap. 4 und z. B. Helmer et al. [1998], Plane et al. [1999]).

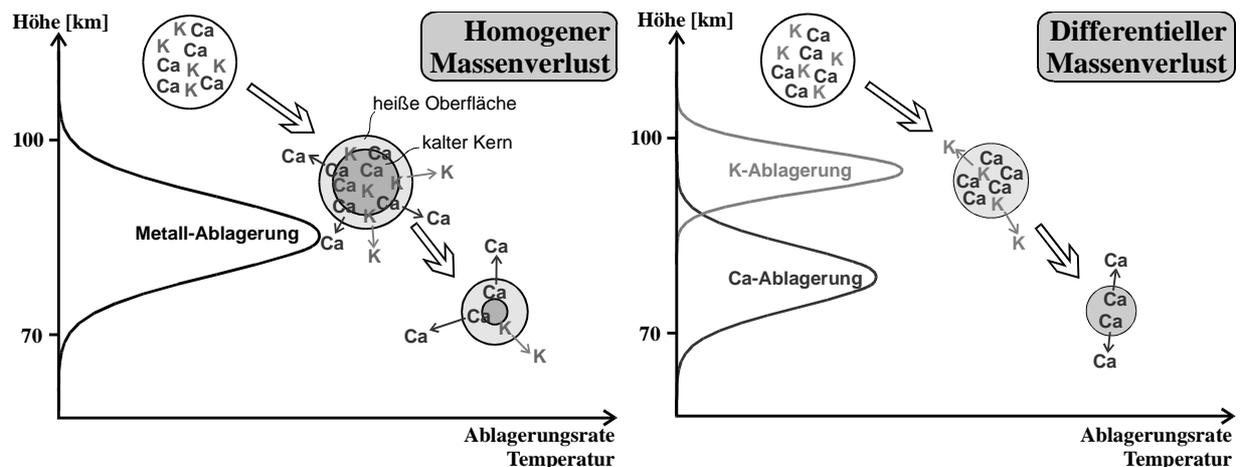


Abb. 6.12: Die Schemata des homogenen und differentiellen Massenverlustes eines Meteoroiden beim Eintritt in die Atmosphäre. Kalium steht hier stellvertretend für niedrigschmelzende Metalle, Calcium für hochschmelzende Metalle.

Nach dem Prinzip des *differentiellen* Massenverlustes bildet sich dagegen kein nennenswerter Temperaturgradient, sondern der Meteoroid erhitzt sich aufgrund seiner geringen Größe gleichmäßig (Abb. 6.12, rechts). Mit dem Ansteigen der Temperatur des Teilchens verdampften zunächst relativ flüchtige Metalle wie Kalium oder Natrium, später die höherschmelzenden wie Eisen oder zuletzt Calcium. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Struktur des Teil-

chens ein Verdampfen nicht nur an der Oberfläche erlaubt. Differentieller Massenverlust vollzieht sich also in porösen Meteoroiden oder aber an einer bereits geschmolzenen Oberfläche.

Das Modell des differentiellen Massenverlustes wurde von *McNeil et al.* [1998b] eingeführt, um die unterschiedlichen Metall-Anteile in CI-Chondriten und in Meteorspuren zu erklären. Basierend auf den Temperaturberechnungen von *Love und Brownlee* [1991] betrachten sie verschiedene Metalle mit unterschiedlichen, temperaturabhängigen Dampfdrücken. Dies führt dazu, daß beim Eintritt eines betrachteten Meteoroiden in die Atmosphäre zunächst die leichter flüchtigen Metalle verdampfen und später die schwerer flüchtigen. Für das schwerer flüchtige Ca führt dies durch zwei Prozesse zur einer Abreicherung gegenüber Fe oder Na [*McNeil et al.*, 1998a]:

- Da sich der Meteoroid während des Verdampfens durch Verdunstungskälte und Energieabstrahlung abkühlt, *abladiert* er u.U. nicht vollständig, sondern hinterläßt einen nicht verdampften Teil. Dieser Rest enthält vor allem die schwer flüchtigen Bestandteile. Der Effekt führt dazu, daß z.B. aus langsamen Meteoroiden (ca. 14 km/s) nur rund 50% des Ca verdampfen, jedoch das gesamte Na. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich der Anteil des verbleibenden Ca aufgrund der höheren Temperaturen und der längeren Ablagerungsphase.
- Da die Ablagerung des Calciums erst in niedrigeren Höhen einsetzt als die Ablagerung flüchtiger Metalle, wird das Ca im Mittel in geringeren Atmosphärenhöhen deponiert. Dadurch wird mehr Ca in Höhen abgelagert, wo es durch Reaktionen mit Ozon, Sauerstoff oder anderen Reaktionspartnern sehr schnell in Moleküle umgesetzt wird (vgl. Kap. 4). Der Anteil des atomaren Calciums in Meteorspuren und auch in der permanenten Ca-Schicht sinkt dadurch unter den ursprünglichen Anteil in Meteoroiden.

McNeil et al. [1998a] finden bei Annahme CI-chondritischer Metallverhältnisse in Meteoroiden und einer bimodalen Geschwindigkeitsverteilung mit Maxima bei $v_g = 11$ km/s und $v_g > 30$ km/s [*Hughes*, 1975; *Brownlee*, 1985] eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und modellierten Verhältnissen der mittleren atmosphärischen Ca- und Na- bzw. Ca^+ - und Na^+ -Dichte. Die in Tab. 6.2 beschriebene Abreicherung von Ca gegenüber Fe in *Meteorspuren* wird jedoch nicht hinreichend gut wiedergegeben. Dies gelingt, wenn man nicht nur atomare Metalle in der Schmelze betrachtet, sondern auch Metalloxide (vgl. u.a. *Harvey* [1973]). So verdampft z.B. gerade bei hohen Temperaturen zunehmend auch als CaO gebundenes Calcium [*W. J. McNeil*, persönliche Mitteilung]. Zunächst entstehen dabei Ca- und O-Atome, die jedoch im Dampf sehr schnell wieder zu gasförmigem CaO rekombinieren können.

Abbildung 6.13 zeigt verschiedene Ergebnisse der Berechnungen. Die linke und mittlere Figur beschreiben die Ablagerung von Meteoroiden von 200 mg Masse für eine geozentrische Eintrittsgeschwindigkeit v_g von 35 km/s und einen Eintrittswinkel α von 45° . Man erkennt, daß man aufgrund der unterschiedlichen Verdampfungshöhen in einer starken Ca-Spur nur noch wenig Fe erwarten kann und umgekehrt. Dies entspricht den in dieser Arbeit gemachten Beobachtungen, nach denen in den meisten Fällen entweder eine deutliche Ca-Spur

oder eine deutliche Fe-Spur in den Lidar-Daten entdeckt wurde. Die rechte Figur zeigt die zu erwartenden Ca/Fe-Verhältnisse für verschiedene Meteoroidenmassen. Danach ist die Beobachtung der tatsächlich gemessenen Ca/Fe-Verhältnisse wahrscheinlicher als die Beobachtung chondritischer Metallverhältnisse. Besonders für Meteoroidenmassen um 10 g wird das beobachtete Verhältnis sehr gut reproduziert.

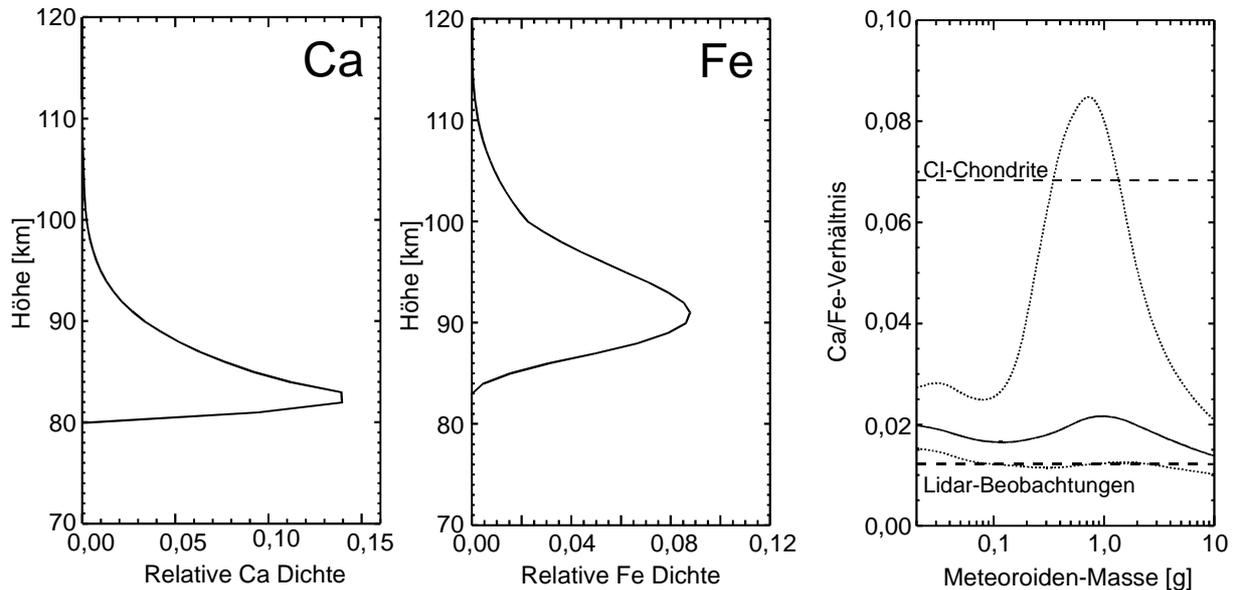


Abb. 6.13: Ergebnisse des differentiellen Verdampfungsmodells mit Metalloxiden [W. J. McNeil, persönliche Mitteilung; von Zahn *et al.*, 1999]. a) Höhenprofil der relativen Ca-Konzentration der Verdampfungsspur eines Meteoroiden mit 200 mg Masse; b) gleiches Bild wie a) für Fe; c) wahrscheinlichstes Ca/Fe-Verhältnis in einer mit dem Lidar beobachteten Verdampfungsspur (mit 50%-Wahrscheinlichkeitsgrenzen). Gemeinsame Parameter: $v_g = 35$ km/s, $\alpha = 45^\circ$, $\rho = 0,6$ g/cm³.

6.3.3 Gleichzeitige Sondierung von Ca- und Ca⁺-Ereignissen

Während im Fall von Ca/Fe-Meteorspuren die Höhenverteilung und der Vergleich mit Modellergebnissen Hinweise auf die Beobachtung großer und/oder schneller Meteoroiden liefert, scheinen für die Ca/Ca⁺-Ereignisse zumindest teilweise andere Partikel verantwortlich zu sein:

- Die durchschnittliche Ca-Menge in Ca/Ca⁺-Spuren ist deutlich geringer als die in Ca/Fe-Spuren (vgl. Tab. 6.2 und 6.3).
- Die mittlere Höhe der Ca/Ca⁺-Ereignisse liegt rund 3,5 km unterhalb der Höhe gemeinsamer Ca/Fe-Ereignisse, was auf kleinere oder langsamere Meteoroiden hindeutet, jedoch 4,5 km oberhalb der typischen Höhe aller Ca-Ereignisse.
- Da zu verschiedenen starken Ca-Ereignissen keine Ca⁺-Spur detektiert wurde, scheint die Beobachtung von Ca⁺-Spuren nicht nur von der Signalstärke bzw. der Stärke der zugehörigen Ca-Spur abzuhängen.

Hieraus folgt, daß die in einer Ablagerungsspur vorhandene Ca⁺-Menge nicht direkt von der Menge des neutralen Calciums abhängt. Da jedoch die Entstehung von Ca⁺-Ionen *nach* Bildung der Spur aufgrund des nur sehr langsamen Ladungsaustauschs mit anderen Kationen

[Rutherford *et al.*, 1972] sehr unwahrscheinlich ist, muß die für die Ionisierung notwendige Energie vom Meteoroiden bereitgestellt werden. Damit kommen nur schnelle Partikel in Frage, von deren Oberfläche aufgrund schneller Stöße mit Luftmolekülen Metallatome ausgeschlagen und gleichzeitig ionisiert werden. Dies deutet auf eine Herkunft der Meteoroiden aus Meteor-schauern, also auf einen kometaeren Ursprung.

6.3.4 Rückschlüsse auf die permanente Ca-Schicht

Das inhomogene Verdampfen von Meteoroiden hat direkte Auswirkungen auf die permanente Metallschicht: Aufgrund des sehr unterschiedlichen Verdampfungsverhaltens kann man nicht mehr erwarten, in der Atmosphäre die gleichen Metallverhältnisse zu beobachten, wie in CI-Chondriten.

- Kleinste (oder sehr langsame) Meteoroiden verdampfen erst in relativ geringen Höhen und auch dann z.T. nicht vollständig, sondern können als Staubteilchen in der Mesosphäre und Stratosphäre verbleiben [Hunten *et al.*, 1980; Brownlee, 1985] oder als Mikrometeorite den Erdboden erreichen [Flynn, 1989]. Diese Partikel zeigen meist einen erhöhten Anteil schwer flüchtiger Metalle, die damit gar nicht in die Metallschicht eingebracht wurden [Flynn, 1989; Brownlee *et al.*, 1997].
- Schnellere Meteoroiden beginnen schon in größeren Höhen zu verdampfen. Auch aus diesen treten leicht flüchtige Metalle wie Natrium früher (also höher) aus als moderat flüchtige wie Eisen oder schwer flüchtige Metalle wie Calcium. Dies führt zu unterschiedlichen Quellfunktionen für die verschiedenen Metalle. Die höhenabhängigen Abbauprozesse wie Ionisation (an der Oberseite der Schicht) oder Dreierstoß-Reaktionen (an der Unterseite der Schicht) bekommen dadurch für die verschiedenen Metalle ein unterschiedliches Gewicht.
- In der Schmelze des Meteoroiden liegen die Metalle z.T. als Oxide vor. Abhängig von der Temperatur des Partikels verdampfen diese Oxide indirekt wieder zu gasförmigen Metalloxiden. Damit verändern sie das Gleichgewicht zwischen Metallatomen und -oxiden in der Atmosphäre. Ohne zu Metallatomen zu reagieren, können die Oxide zu anderen, als permanente Senke fungierenden Molekülen abgebaut werden.

Für das schwer flüchtige Calcium kann man deswegen eine Abreicherung gegenüber Metallen wie Eisen oder Natrium erwarten. Das unterschiedliche Ablagerungsverhalten hat einen wichtigen Einfluß auf die Modellierung der Ca-Schicht (vgl. Kapitel 4) und führt a) zu unterschiedlichen Höhenverteilungen des abgelagerten Metalls und b) zu dem als *Verdampfungseffektivität* eingeführten Skalierungsfaktor: Nach den Ergebnissen dieses Abschnitts trägt höchstens ein sechstel des Calciums in Meteoroiden zur atomaren Ca-Schicht bei.

Wie in Abb. 6.2 deutlich wurde, ist Calcium in der Atmosphäre mit einem Faktor 30 gegenüber Fe ca. fünfmal stärker abgereichert, als alleine durch den differentiellen Massenverlust erklärt werden kann. Diese weitere Abreicherung ist der eigentliche Grund für die größere Empfindlichkeit des Ca-Lidars für zusätzlichen Ca-Eintrag durch Meteoroiden. Sie wird im Abschnitt 6.4.2 diskutiert.

Die Verdampfungsmodelle machen jedoch keine Aussagen zum Verhältnis von neutralem und ionisiertem Calcium. Bei Betrachtung des mittleren Ca/Ca^+ -Verhältnisses innerhalb der beobachteten Meteorspuren (ca. 0,6) fällt jedoch die Ähnlichkeit mit den atmosphärischen Säulendichteverhältnissen (ca. 0,4) auf. Daraus darf man aber nicht schließen, daß sich der Atom- und Ioneneintrag aus Meteoroiden direkt auf die Säulendichten auswirkt. Wie im Kap. 4 gezeigt wurde, befinden sich Ca-Atome und $-\text{Ionen}$ in einem komplexen chemischen Gleichgewicht mit Oxiden, Hydroxiden etc. Andererseits wird das Ca/Ca^+ -Verhältnis in Meteorspuren noch nicht vom Gleichgewichtsverhältnis innerhalb der Metallschicht beeinflusst, da die in der Nacht wirksamen Ladungsaustauschreaktionen Zeitkonstanten von vielen Stunden haben (vgl. Tab. 4.1). Der Anteil des ionisierten Calciums am verdampften Ca gibt jedoch Informationen über die Temperaturen beim Verdampfen des Meteoroiden. Die dazu notwendigen zeitabhängigen, chemisch-dynamischen Modelle liegen aber z.Zt. noch nicht vor.

Der hohe Anteil von Ca^+ -Ionen am gesamten Calcium in der Atmosphäre (vgl. Abb. 4.6 und 6.6) kann jedoch nicht direkt auf das Verdampfungsverhalten der Meteoroiden zurückgeführt werden, da das Ionisierungspotential von Ca sogar höher ist als das von Na oder K. Das Ca-Modell führt die relativ hohe Ca^+ -Menge auf die unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten bei Ladungsaustausch- und Rekombinationsreaktionen zurück (vgl. Kap. 4). Die Korrelation der Herbstmaxima von Ca und Ca^+ kann aber außer durch das chemische Gleichgewicht auch durch die nur im Herbst auftretenden Meteorschauer mit extrem schnellen Partikeln [Jenniskens, 1994; Rendtel et al., 1995] verursacht werden, da gerade schnelle Meteoroiden einen hohen Anteil von Ca^+ im verdampften Material verursachen.

6.4 Diskussion

6.4.1 Lidar-Meteorspuren im Vergleich mit anderen Messungen

Bisher berichteten nur wenige Veröffentlichungen über die Beobachtung von Ablagerungsspuren verdampfender Meteoroiden mit dem Lidar [Beatty et al., 1988; She et al., 1991, Kane und Gardner, 1993a; Höffner et al., 1999]. Unter diesen umfaßt nur Kane und Gardner [1993a] einen größeren Datensatz von insgesamt 106 Na-Spuren (und einer simultanen Fe-Spur). Im Durchschnitt erhielten sie dabei 0,2 Na-Ereignisse pro Stunde. Dies ist um einen Faktor 6 weniger als die hier berichtete Ca-Rate, und weniger als ein Viertel der hier beobachteten Fe-Rate. Diese Diskrepanz entsteht zum einen aufgrund der längeren Integrationszeit des dort verwendeten Instruments (30 s), die es für meist nur wenige Sekunden lange Spuren unempfindlicher macht. Zum anderen werden aufgrund der Anreicherung der Na-Schicht im Vergleich zu chondritischen Verhältnissen nur starke Spuren sicher erkannt.

Alle Veröffentlichungen von Verdampfungs Spuren beziehen sich auf die Metalle Natrium, Eisen und Kalium. In den Veröffentlichungen zur Ca-Schicht werden Meteoroidenspuren nicht erwähnt. Dies hängt vor allem mit der langen Integrationszeit von mindestens einer Minute der meisten Ca-Lidars zusammen [Granier et al., 1989; Qian und Gardner, 1995]. In der Regel wurde bisher nur jeweils ein Metall zur Zeit untersucht. Eine erste und bisher einzige simultane Sondierung einer Meteoroidenspur in zwei Metall-Lidars gelang Kane und Gardner

[1993a] mit gleichzeitiger Beobachtung von Fe und Na. Da nur zu wenigen Gelegenheiten zwei Metall-Lidars gleichzeitig an einem Ort mit dem selben Beobachtungsvolumen betrieben wurden, gibt es bisher auch keinerlei Berichte über das „Fehlen“ eines Metalls innerhalb der Ablagerungsspuren.

Außer mit Metall-Resonanz-Lidars wurde die Zusammensetzung von Meteorspuren nur noch mit optischen Spektrometern untersucht [Harvey, 1973; Ceplecha et al., 1998]. Obwohl die Metallverhältnisse in den Veröffentlichungen meist als „chondritisch“ angegeben werden, zeigen die veröffentlichten Daten selbst zum einen eine sehr große Variabilität der Zusammensetzung, zum anderen fast immer eine Abreicherung des Ca und häufig eine Anreicherung von Na im Verhältnis zu Fe [Ceplecha et al., 1998]. Jedoch gibt schon Harvey [1973] Hinweise darauf, daß die Quelle der spektrometrisch erfaßten Strahlung in der Schockfront vor dem Meteoroiden liegt. Es erscheint damit wahrscheinlich, daß die in den Spektren sichtbaren Metalle zum Teil aus der atmosphärischen Metallschicht, nicht aber aus dem Meteoroiden selbst stammen, wie auch Borovi ka [1993] andeutet. Love und Brownlee [1991] bestätigen, daß die Wechselwirkung von Schockfront und Meteoroid erst bei Partikeln größer als 1 cm Durchmesser eine Rolle spielt, bei kleineren Partikeln also kein Teilchenfluß aus dem Partikel in die Schockfront stattfindet.

Die Höhenverteilung der im Rahmen dieser Arbeit beobachteten 745 Meteoroidenspuren (nur Calcium und Eisen, siehe Abb. 6.6) entspricht grob dem mittleren Höhenprofil der Metallschichten. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Kane und Gardner [1993a] bei der Zusammenfassung ihrer Na-Ereignisse. Aus der Beschreibung des differentiellen Massenverlustes würde man jedoch ein tieferes Verteilungsmaximum des schwerer flüchtigen Ca gegenüber Fe erwarten – oder eine zumindest identische Höhe, sofern sich der Massenverlust homogen vollzieht. Dies ist nicht der Fall. Kane und Gardner [1993a] beobachten dagegen tatsächlich das Maximum der Verteilung ihrer Na-Ereignissen ca. 2 km oberhalb des hier vorgestellten Ca-Maximums. Das Höhenprofil der mit dem Lidar beobachteten Meteorspuren spiegelt jedoch nicht die wirkliche Höhenverteilung verdampfender Meteoroiden wieder. Die beobachtete Höhenverteilung ist vielmehr ein Abbild verschiedener atmosphärischer Parameter [Höffner et al., 1999], wie

- der ursprünglichen Höhenverteilung,
- dem Windfeld, daß eine Ablagerungsspur überhaupt erst durch das Lidarsichtfeld transportiert,
- der (molekularen und turbulenten) Diffusion, die eine Ablagerungsspur „verdünnt“, bis sie sich nicht mehr signifikant von der permanenten Metallschicht abhebt, und
- chemischen Umsetzungsprozessen wie Ionisationsreaktionen oder Dreierstoß-Reaktionen.

Aus den Berechnungen dieser Parameter lassen sich typische Wahrscheinlichkeitsprofile für die Beobachtung einer Verdampfungsspur berechnen, die weitgehend den beobachteten Verteilungen entsprechen [Höffner et al., 1999; von Zahn et al., 1999].

Betrachtet man nur die gleichzeitigen Ca/Fe-Ereignisse, so fällt die größere Verdampfungshöhe im Vergleich zum Mittel aller Beobachtungen auf. Dies rührt daher, daß vor allem schnelle Meteoroiden sich an der Oberfläche so schnell und so stark aufheizen, daß ein gleichmäßiger Massenverlust einsetzt. Daher verdampfen sie höher als die Mehrzahl der kleinen bzw. langsamen Partikel [von Zahn et al., 1999], die zudem die einzelnen Metalle abhängig von ihren Siedepunkten freisetzen.

Auch Lidar-Sondierungen von Ca^+ -Ionenspuren verdampfter Meteoroiden wurden bisher nicht veröffentlicht. Neben der geringeren Signalstärke anderer Instrumente (vgl. Abschnitt 3.4.1) liegt der Hauptgrund in den sonst üblichen Integrationszeiten von mehreren 10 s. Schon früh wurden Ca^+ -Ionen dagegen durch Messungen mit optischen Spektrometern in Meteorspuren nachgewiesen [Halliday, 1961; Borovi ka, 1994a]. Aus Temperaturmessungen leitete man dabei ab, daß Ca^+ -Ionen vor allem in Spuren schneller Meteoroiden auftraten [Borovi ka, 1994b]. Dies bestätigt die in Abschnitt 6.3.3 genannte These, nach der der Nachweis von Ca^+ in Lidar-Profilen bestimmte Partikelgeschwindigkeiten voraussetzt, aber nicht direkt an die Stärke der Spur neutralen Calciums gebunden ist. Auch Harvey [1973] gibt nach Modellrechnungen einen mit der Geschwindigkeit des Meteoroiden zunehmenden Anteil von Ca^+ -Ionen an.

6.4.2 Differentieller und homogener Massenverlust

Eines der Hauptargumente für das Prinzip des differentiellen Massenverlustes ist das kontinuierliche Aufheizen des Meteoroiden. Die maximale Temperatur hängt dabei u.a. von der Größe und Geschwindigkeit des Partikels ab, überschreitet aber nach Rechnungen von Love und Brownlee [1991] nur selten 1700 K. Das hier beschriebene Modell [McNeil et al., 1998b] benutzt den gleichen Algorithmus. Die mit optischen Spektrometern nahezu einheitlich ermittelten Gas-Temperaturen von rund 4000 K [Harvey, 1973; Borovi ka, 1994b; Jenniskens, 1999] bzw. in Einzelfällen bis 10.000 K [Borovi ka, 1994b] sprechen jedoch gegen differentiellen und für homogenen Massenverlust, zumal in der Regel Spektrallinien aller meteoroidischen Metalle beobachtet werden. Bei derart hohen Temperaturen verdampfen alle Metalle unabhängig von ihrem Siedepunkt in Sekundenbruchteilen in atomarer oder ionisierter Form. Verschiedene Argumente zeigen aber, daß die so ermittelten Temperaturen nur wenige Aussagen über das Verdampfungsverhalten des Meteoroiden selbst machen:

- Spektrometermessungen bilden nur eine kleine Gruppe von besonders großen Meteoroiden ab. Diese bilden das optische Phänomen der *Feuerkugel*, also besonders lichtstarke Meteore. Wie oben erläutert, erwartet man hier auch nach McNeil et al. [1998b] eher einen homogenen Massenverlust als differentielle Ablation.
- Die – im Detail noch unverstandene – Unabhängigkeit der Temperaturwerte von Geschwindigkeit oder Eintrittswinkel der Meteoroiden [P. Jenniskens, persönliche Mitteilung] deutet darauf hin, daß die Gas-Temperaturen weniger von Partikel-Parametern abhängen, sondern Eigenschaften des umgebenden Gases sind. So nennt Harvey [1973] die Schockfront vor dem Meteoroiden als Quelle der von ihm abgeleiteten Tempera-

turen. Es gelangt jedoch im allgemeinen nur eine geringe Menge verdampften Materials in die Schockfront und damit in den Bereich sehr hoher Temperaturen. Der größte Teil der Ablagerungsspur würde damit von Metallen gebildet, die höchstens bis 1700-2000 K geheizt wurden. Zusätzlich erscheint fraglich, ob sich vor den mit dem Lidar beobachteten, relativ kleinen Meteoroiden über 85 km Höhe aufgrund der geringen Luftdichte (vgl. Abb. 1.1) überhaupt eine Schockfront ausbilden kann.

Auch das nicht verdampfte kosmische Material gibt Hinweise auf das Verdampfungsverhalten beim Eintritt in die Atmosphäre. Untersuchungen an Meteoriten und in der Stratosphäre gesammelten IDPs stützen zum großen Teil die Theorie des differentiellen Massenverlustes. So beobachtet man im Inneren von chondritischen Meteoriten die typische chondritische Zusammensetzung. Der äußere, geschmolzene und wieder erstarrte Teil des Meteoriten enthält jedoch meist relativ geringe Konzentrationen an flüchtigen Metallen wie Na, K oder Li [Kerridge und Matthews, 1988] und damit Indizien für differentielles Verdampfen. Die Materialstruktur einer Gruppe von IDPs deutet auf Temperaturen von zeitweilig mehreren 100 °C hin [Greshake et al., 1998]. Dort findet man teilweise ebenfalls eine Abreicherung flüchtiger Metalle [Brownlee et al., 1997].

Das Prinzip des differentiellen Massenverlustes wird also mit unabhängigen Methoden bestätigt. Der zusätzliche Aspekt des Verdampfens von Metall-Oxiden wird von den allgemein anerkannten Laborexperimenten an geheizten Meteoriten von Notsu et al. [1973] bestätigt. Abbildung 6.13 zeigt allerdings, daß auch Modellrechnungen zum differentiellen Massenverlust die Abreicherung von Ca in Meteorspuren nur dann vollständig erklären können, wenn man große Meteoroiden von ca. 10 g Masse annimmt. Da diese sehr selten sind, bleibt für den allgemeinen Fall eine restliche Abreicherung zu erklären. Diese kann in der von Hunten et al. [1980] beschriebenen Rekondensation verdampften Materials bestehen. Diese ist besonders wirksam, wenn die Temperatur nur knapp zum *Abladieren* eines Metalls ausreicht. Rekondensation muß damit bei dem schwer flüchtigen Calcium eher berücksichtigt werden als bei Eisen. Dies gilt genauso für das *Abladieren* geschmolzenen, aber noch nicht verdampften Materials, das in McNeil et al. [1998a] nicht berücksichtigt ist.

6.4.3 Weiterführende Untersuchungen

Es wurde gezeigt, daß das Metall-Lidar ein geeignetes Instrument zum Bestimmen der Metallkonzentrationen in Meteorspuren ist. Mit Hilfe von Verdampfungsmodellen kann aus den Spuren auf die Metallanteile im Meteoroiden selbst geschlossen werden. Die Lidardaten enthalten jedoch keine Informationen über die (kometare oder asteroidale) Herkunft des Meteoroiden. Diese Herkunft ist jedoch wichtig in Bezug auf die Eintrittsgeschwindigkeit, die zu erwartende Massendichte des Meteoroiden, die bereits erlebten Aufheizprozesse und mineralogischen Metamorphosen usw. Das Alter einer Ablagerungsspur und damit das Maß der chemischen Umsetzung kann nur indirekt mit Hilfe eines Modells abgeschätzt werden.

Zur Beurteilung von Spuralter und Herkunft des Meteoroiden wurde am IAP im Herbst 1998 eine Nachthimmelskamera mit Restlichtverstärker installiert. Diese liefert permanent eine

Videsequenz (25 Bilder/Sekunde) eines Himmelsausschnitts mit ca. $9,6^\circ \cdot 12,9^\circ$ vollem Öffnungswinkel, das mit einer bildverarbeitenden Software auf Meteorspuren durchsucht wird (Abb. 6.14). Die Empfindlichkeit solcher Geräte wird mit Sternhelligkeiten verglichen. Das System erkennt Meteore bis zur Größenklasse +8 Mag [Molau et al., 1997], ist also empfindlicher als das Auge (Grenzgröße für Meteore +6 Mag, vergleichbar mit der Helligkeit der Milchstraße) [Bone, 1993]. Die Software berechnet aus Winkelgeschwindigkeit und Richtung des Meteors die Herkunft aus einem Schauer (kometarer Meteoroid) oder aus dem sporadischen Hintergrund (wahrscheinlich asteroidaler Meteoroid). Aus dem Aufleuchtzeitpunkt und dem Erscheinen der Ablagerungsspur im Lidarsichtfeld kann das Alter der Lidarspur bestimmt werden. Diese genaue Altersangabe kann dann wiederum für Berechnungen der Lebensdauer der Metalle in der jeweiligen Höhe genutzt werden. Zusammen mit dem Durchmesser der Spur erhält man Informationen über die Diffusionsgeschwindigkeit.

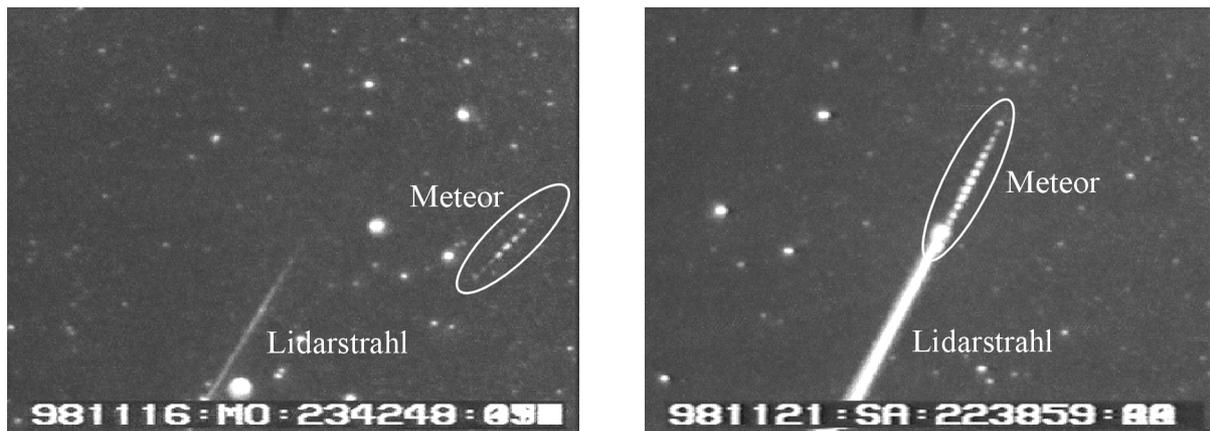


Abb. 6.14: Aufnahmen der Nachthimmelskamera mit Meteorspuren. links: 16.11.1998, 22:42:48 UT. Die Spur ist möglicherweise mit Ereignis Nr. 10 (13 min später) oder Ereignis Nr. 11 (25 min später) aus Tab. 6.2 korreliert. rechts: 21.11.1998, 21:38:59 UT, sporadischer Meteor. Der sehr langsame Meteoroid wurde in der gleichen Sekunde im Kalium-Lidar detektiert [J. Höffner, persönliche Mitteilung], nicht aber im Ca- oder Fe-Lidar.

Zur Zeit bestehen jedoch noch Schwierigkeiten, Kameraspuren mit den Lidar-Ereignissen zu korrelieren. Häufig werden vor einem Lidar-Ereignis mehrere Meteore detektiert, die als Kandidaten in Frage kommen. Zusätzliche Kenntnis des Windfeldes in der Verdampfungshöhe könnte hier neben den Erfahrungen eines größeren Datensatzes die Korrelation erleichtern. An der Außenstelle des IAP in Juliusruh/Rügen wird zu diesem Zweck ein Meteor-Radar installiert, das unter bestimmten geometrischen Bedingungen die Ionisationsspur eines z.B. über Kühlungsborn im Zenit aufleuchtenden Meteors detektieren soll. Mit interferometrischen Methoden kann aus den so erhaltenen Daten neben der Höhe der Spur auch die Windstärke und -richtung in Höhe der Spur bestimmt werden.

Da Meteorspuren auch eine Verletzung des chemischen Gleichgewichts bedeuten, können sie Hinweise auf Reaktionsgeschwindigkeiten der untersuchten Metalle geben: Obwohl die in Tabelle 6.2 gezeigten Ereignisse Nr. 7, 8 und 9 wahrscheinlich zu einer einzelnen Ablagerungsspur gehören, sind ihre Ca/Fe-Verhältnisse nicht gleich. Das Ca/Fe-Verhältnis ist z.B.

beim tiefsten und letzten Ereignis Nr. 9 um 25% geringer als bei Nr. 8⁵, obwohl man gemäß dem differentiellen Verdampfungsmodell in Nr. 9 einen höheren Ca-Anteil erwarten könnte [McNeil *et al.*, 1998b; Gerding *et al.*, 1998b]. Die erhöhte Konzentration der Meteorspur sollte sich aber mit der Zeit an die Gleichgewichtskonzentration der permanenten Metallschicht anpassen. Für den chemischen Abbau von Metallen in der oberen Mesosphäre ist vor allem die Reaktion mit Ozon verantwortlich. Dieser Abbau wird durch die Rückreaktion des Metalloxids mit atomarem Sauerstoff wieder teilweise ausgeglichen. Beide Reaktionen zusammen führen innerhalb weniger Minuten zum Abbau des gesamten Metalls an der Unterseite der Metallschichten (vgl. Kap. 3 und 4).

Aus einem Abbau von 25% der Ca-Menge innerhalb von 4 min ergibt sich ein Unterschied in den Lebensdauern von 14 min (Abbau bis auf 37% der Anfangskonzentration). Da weder die beim Verdampfen deponierte Menge der einzelnen Metalle gemessen werden kann, noch das Alter der Spur bekannt ist, kann die eigentliche Lebensdauer der Metalle aus diesen Daten nicht berechnet werden. Für eine detailliertere Betrachtung der Reaktionsgeschwindigkeiten muß der Datensatz noch erweitert werden. Laboruntersuchungen der beteiligten Reaktionen bestätigen die längere Lebensdauer der Fe-Atome jedoch qualitativ (vgl. Kap. 4 und Plane und Nien [1990], Helmer *et al.* [1993 und 1998]).

⁵ Ein Vergleich zwischen den etwa gleich hohen Ereignissen Nr. 8/9 und der sehr hohen Spur Nr. 7 soll hier nicht erfolgen, da der Höhenunterschied von mindestens 14 km vielfältige Folgen für die Ca- und Fe-Konzentration haben kann.

7 Ergebnisse und Ausblick

Innerhalb von rund 2 Jahren wurden in 113 nächtlichen Sondierungen zweier simultan betriebener Metall-Lidars verschiedene Datensätze erhalten und in dieser Arbeit beschrieben:

- Ein Jahresgang der Ca-Schicht aus 112 mehrstündigen Sondierungen,
- ein Jahresgang der Ca⁺-Schicht aus 58 mehrstündigen Sondierungen,
- ergänzende Fe- und Na-Profile aus zusammen 47 mehrstündigen Sondierungen,
- ein Satz von 89 sporadischen Ca- und 99 sporadischen Ca⁺-Schichten, die ca. 38% (Ca) bzw. rund 100% (Ca⁺) der gesamten Meßzeit dieses Metalls abdeckten,
- ein Satz von insgesamt 654 Meteorspuren in Ca-Profilen (1,3 h⁻¹), 91 Fe-Spuren (0,9 h⁻¹) sowie 58 Ca⁺-Spuren (0,2 h⁻¹).

Der Jahresgang der Ca-Schicht zeigt ein erstes Dichtemaximum im Sommer (ca. 30 cm⁻³) sowie ein zu größeren Höhen verschobenes, stärkeres Maximum im Herbst (mehr als 40 cm⁻³). Zum Januar sinkt die Dichte dann stark ab. Die mittlere Säulendichte liegt bei 2,4·10⁷ cm⁻², die maximale Dichte im Mittel bei 22 cm⁻³ in 89,9 km Höhe. Im Unterschied zu anderen Metallen (z.B. *Plane et al.* [1999] für Na) zeigt die Ca-Schicht zwar im Jahresgang der Höhe und Breite der Schicht eine Symmetrie zu den Solstitien, nicht aber im Dichte-Jahresgang. Die Ca⁺-Ionenschicht ist dominiert von sporadischen Schichten, die z.T. mehrere Tage nacheinander in der gleichen Höhe beobachtet wurden, insgesamt aber ein große Variabilität zeigen. Auch die Ca⁺-Ionenschicht besitzt ein Dichte-Maximum im Herbst. Die mittlere Säulendichte liegt mit 4,9·10⁷ cm⁻² rund doppelt so hoch wie die Ca-Dichte.

In einem eindimensionalen, zeitunabhängigen Chemiemodell konnte durch Anpassung einzelner noch nicht im Labor gemessener Reaktionsraten das mittlere Profil der Ca-Schicht sehr gut abgebildet werden. Eine Abbildung des Jahresgangs der Ca-Säulendichte gelang erst nach zusätzlichen Annahmen über die Quelle der Metallschicht, die über die allgemein akzeptierten Annahmen einer Abhängigkeit vom Eintrag (sporadischen) kosmischen Staubes hinausgehen. Ohne weitere Annahmen ergab sich alleine aus der Modellierung der neutralen Schicht eine mit den Beobachtungen übereinstimmende Unterkante der Ca⁺-Ionenschicht. Die ungewöhnlich hohe Säulendichte der Ionen konnte ebenfalls aus den erhaltenen Ratenkoeffizienten erklärt werden.

Das in der Literatur viel diskutierte Problem sporadischer Metallschichten konnte im Rahmen dieser Arbeit anhand vieler simultaner Sondierungen von Ca und Ca⁺ experimentell untersucht werden. Beispiele für sporadische Ca- und Ca⁺-Schichten wurden in Fallstudien vorgestellt. In 112 Ca-Sondierungen (davon 58 gleichzeitig mit Ca⁺-Sondierungen) konnte eine Höhenverteilung und saisonale Variation sporadischer Schichten ermittelt werden. Die Höhenverteilung ergibt unterhalb von 90 km sehr wenige sporadische und dann überwiegend alleinige Ca-Schichten, zwischen 90 und 95 km Höhe überwiegend gemeinsame Ca_s/Ca⁺_s und oberhalb von 95 km zunehmend alleinige Ca⁺_s. Der Jahresgang der Häufigkeit von Ca_s besitzt ein Minimum im Sommer und ein Maximum im Frühjahr und Herbst eines Jahres. Das Datenmaterial gibt viele Hinweise auf die Entstehung von Ca_s aus Ca⁺_s, die wiederum mit E_s korre-

lieren. Dieser Mechanismus scheint vor allem bei starken sporadischen Schichten wirksam zu sein, er erklärt aber nicht die Diskrepanz in den saisonalen Variationen von E_S und *allen* Ca_S . Hierzu wurde ein neuer Mechanismus vorgeschlagen, der den hohen Ionen-Anteil am gesamten Calcium und die Sauerstoff-Chemie der Ionen einbezieht. Daneben kommt in Einzelfällen auch die Bildung von sporadischen Schichten aus verdampfenden Meteoroiden eines Meteorschauers zum Tragen.

Eine genauere Bestimmung des jeweiligen Prozesses erfordert zusätzliche Meßdaten wie die Sauerstoff-Konzentration, die Elektronendichte und die vertikale Windgeschwindigkeit. Hierbei ist außerdem zu berücksichtigen, daß man bei stationären Lidarmessungen nicht zwischen im Sichtfeld entstehenden Schichten und durch horizontale Winde ins Sichtfeld driftenden – bereits voll ausgebildeten - Schichten unterscheiden kann.

Die Beobachtungsdaten enthalten außerdem mehrere hundert Verdampfungsspuren von Meteoroiden. Überraschenderweise sind darin Spuren einzelner Metalle deutlich häufiger als solche, die parallel in beiden Lidars beobachtet werden. Die 12 simultan im Ca- und Fe-Lidar beobachteten Spuren zeigen ein relativ konstantes Verhältnis der Atomdichten, daß jedoch um den Faktor 6 von dem für die verdampfenden Meteoroiden angenommenen Verhältnis aus CI-Chondriten abweicht. Diese Abweichung erklärt einen Teil der im Chemie-Modell vorgenommenen Annahmen zum Verdampfungsverhalten des kosmischen Staubes. Die Ergebnisse der Beobachtungen können mit Hilfe eines in den USA entwickelten Modells zum Verdampfungsverhalten von Meteoroiden [McNeil *et al.*, 1998] interpretiert werden. Das Modell berücksichtigt die individuellen Verdampfungstemperaturen der verschiedenen Spezies im Meteoroiden und ergibt verschiedene Metallverhältnisse abhängig von Größe und Geschwindigkeit des Partikels. Das vorher in der Regel angenommene gleichzeitige (homogene) Verdampfen aller Metalle ist in diesem Modell als Grenzfall enthalten. Es zeigt sich, daß Ca vor allem aus großen oder schnellen Meteoroiden verdampft, der Eintrag aus dem sporadischen Hintergrund des kosmischen Staubes jedoch relativ ineffektiv ist. Diese Erkenntnisse werden direkt im Chemie-Modell genutzt.

Aufgrund der ständigen simultanen Sondierung zweier Metallspezies durch das IAP-Doppellidar wurden in dieser Arbeit an vielen Stellen Vergleiche zwischen zwei Metallen (Ca/Fe) bzw. zwischen dem Ca-Atom und dem Ca^+ -Ion angestellt. Diese Vergleiche vertiefen das Verständnis der Abläufe innerhalb der Metallschicht, während in Veröffentlichungen anderer Metalle häufig nur ein Metall behandelt wird. Raum für zukünftige Arbeiten bietet die Auswertung der parallelen Sondierung dreier Metalle im selben Atmosphärenvolumen. Durch die Kombination des IAP-Doppellidars mit dem IAP-K-Lidar am selben Standort bieten sich hier weltweit einmalige Möglichkeiten, die in Einzelfällen bereits genutzt werden [Gerding *et al.*, 1999b]. Wie im Ausblick des vorhergehenden Kapitels bereits genannt, lassen sich Lidar-Sondierungen von Spuren verdampfter Meteoroiden sinnvoll mit visuellen Beobachtungen und Radar-Messungen der Ionisationsspuren verbinden. Hierzu konnten am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik bereits erste gleichzeitige Beobachtungen von Lidar und Nachthimmelskamera durchgeführt werden.

A Theoretische Grundlagen der Dichteberechnung

Da die Berechnung von Metaldichten aus Lidardaten bereits in mehreren Dissertation [von der Gathen, 1990; Alpers, 1993; Eska, 1998] und Veröffentlichungen [Fricke und von Zahn, 1985; Tilgner und von Zahn, 1988] behandelt wurde, erfolgte in Kapitel 2 nur eine grobe Beschreibung des Meßprinzips. An dieser Stelle werden die Berechnung des effektiven Rückstreuquerschnitts sowie die Fehlergrenzen bei der Dichteberechnung näher erläutert.

Der Resonanz-Rückstreuquerschnitt für Metalle ohne Hyperfeinstruktur ist durch die folgende Gauß-Funktion gegeben [Fricke und von Zahn, 1985; Alpers, 1993]:

$$\sigma(\Omega, \lambda) = \frac{e^2}{16\pi \epsilon_0 c^2 m_e} \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi T}} \cdot q(\Omega) \cdot f \cdot \lambda_0^2 \cdot e^{-D(\lambda - \lambda_0)^2 / T} \quad (\text{A.1})$$

mit

$$D = \frac{c^2 \cdot m_{Atom}}{2k \cdot \lambda_0^2},$$

λ_0 Zentralwellenlänge des elektronischen Übergangs,

e Elementarladung,

m_e Elektronenmasse,

k Boltzmann-Konstante,

c Lichtgeschwindigkeit in Luft,

ϵ_0 elektrische Feldkonstante,

Ω Raumwinkel [Steradian],

f Oszillatorenstärke,

T Temperatur,

$q(\Omega)$ geometrischer Faktor der Abstrahlung (Hanle-Faktor).

Die meisten dieser Werte sind als physikalische Konstanten hinreichend genau bekannt. Die Temperatur kann aus Referenzatmosphären entnommen werden.

A.1 Berechnung des Hanle-Faktors

Die Gleichung A.1 zeigt eine Abhängigkeit des Resonanz-Rückstreuquerschnitts von verschiedenen atomphysikalischen Parametern und von einem *Hanle-Faktor* genannten Geometrie-Faktor $q(\Omega)$. Der Hanle-Faktor berücksichtigt die Abweichung der Geometrie eines resonant gestreuten Photons von dem eines idealen Hertzschen Dipols unter Einwirkung eines äußeren Magnetfelds. *Hanle* [1924] hat erstmals experimentell nachgewiesen, daß ein äußeres Magnetfeld zu einer Präzessionsbewegung des angeregten Elektrons um die Magnetfeldachse führt. Auf diese Weise wird die Polarisationsrichtung der Lichtwelle während der Emission gedreht und die Geometrie der Abstrahlung geändert. Die Stärke dieses Hanle-Effektes hängt von der Lebensdauer des angeregten Zustands, von der Polarisationsrichtung des eingestrahnten

Lichts sowie von der Stärke des äußeren Magnetfelds ab. Bereits bei den schwachen magnetischen Feldern der oberen Atmosphäre kann der Hanle-Faktor nicht mehr vernachlässigt werden.

Für die folgende Rechnung [Zimmermann, 1975] wird angenommen, daß die spektralen Verteilungen von eingestrahlttem und gestreutem Licht konstant sind. Außerdem seien Grundzustand und angeregter Zustand gleich besetzt. Das verwendete Laserlicht ist zirkular polarisiert. Bei Anwendung des *Breit-Formalismus* ergibt sich nach Wahl des kartesischen Koordinatensystems mit z-Achse parallel zum äußeren Magnetfeld der nicht normierte Geometriefaktor q' als Verhältnis von eingestrahelter zu gestreuter Intensität nach Zimmermann [1975] zu

$$q'_n = \sum_{k,g} (-1)^{k+g} \left\{ \begin{matrix} 1 & 1 & k \\ J & J & J_0 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} J & J & k \\ F & F & I \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 1 & 1 & k \\ F & F & f \end{matrix} \right\} \cdot \Phi_{-q}^k(\vec{e}) \cdot \Phi_q^k(\vec{u}) \cdot \left(1 + i g g_f \frac{\mu_B \tau H_z}{\hbar} \right)^{-1} \quad (\text{A.2})$$

mit den geschweiften Klammern als 6j-Symbole. Außerdem gelten folgende Bezeichnungen:

- J, F Hyperfeinstruktur-Quantenzahlen des angeregten Niveaus,
- J_0, F Quantenzahlen des Grundzustandes,
- Φ_q^k Polarisationsensoren des emittierten und des gestreuten Lichts,
- g_f Landé-Faktoren,
- μ_B Bohrsches Magneton,
- τ Lebensdauer des angeregten Zustands,
- H_z magnetische Feldstärke in z-Richtung,
- \hbar $h/2\pi$, h Plancksches Wirkungsquantum,
- k Index (0, 1, 2).

Die Landé-Faktoren ergeben sich aus

$$g_f = g_J \cdot \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \quad (\text{A.3})$$

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (\text{A.4})$$

Der Geometriefaktor wird nach *Fricke und von Zahn* [1985] normiert über

$$4\pi = \int_{\Omega} q_n(\Omega) d\Omega = \int_{\Omega} N_n \cdot q'_n(\Omega) d\Omega \quad (\text{A.5})$$

Die Summation muß nur für $k \leq 2$ ausgeführt werden, da alle anderen 6j-Symbole gleich Null sind [D'Yakonov, 1964]. Die Polarisationsensoren Φ_q^k sind bei Zimmermann [1975] angegeben. Die magnetische Feldstärke beträgt am Standort Kühlungsborn (54° N, 12° O) etwa 50 μT . Gleichung (A.2) kann damit vereinfacht werden zu

$$q'_n = \sum_{k=0}^2 \{6j\}(k) \cdot \Sigma(k) \quad (\text{A.6})$$

$$\text{mit } \{6j\}(k) = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & k \\ J & J & J_0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} J & J & k \\ F & F & I \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & k \\ F & F & f \end{Bmatrix}$$

$$\Sigma(k) = \sum_{q=-k}^k (-1)^{k+q} \cdot \Phi_{-q}^k(\vec{e}) \cdot \Phi_q^k(\vec{u}) \cdot \left(1 + iqg_f \frac{\mu_B \tau H_z}{\hbar}\right)^{-1}$$

Nach Einsetzen der bekannten Größen gilt für die $\Sigma(k)$ -Terme (mit $y = \mu_B \cdot \tau H_z / \hbar$):

$$\Sigma(0) = \frac{2}{3}$$

$$\Sigma(1) = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$\Sigma(2) = \sin^4 \vartheta_e \cdot (0,75 + (4 + 16g_f^2 y^2)^{-1}) + \sin^2 \vartheta_e \cdot (\cos^2 \vartheta_e \cdot (1 + g_f^2 y^2)^{-1} - 1) + \frac{1}{3}$$

Der nicht normierte geometrische Faktor setzt sich zusammen aus

$$q' = \{6j\}(0) \cdot \Sigma(0) + \{6j\}(1) \cdot \Sigma(1) + \{6j\}(2) \cdot \Sigma(2) \quad (\text{A.8})$$

Mit einer Normierung auf den Anteil $k = 0$

$$q(\Omega = 180^\circ) = \frac{q'}{\{6j\}(0) \cdot \Sigma(0)} \quad (\text{A.9})$$

und mit $\Sigma(1) = 0$ erhält man

$$q(\Omega = 180^\circ) = 1 + \frac{\{6j\}(2) \cdot \Sigma(2)}{\{6j\}(0) \cdot \Sigma(0)} \quad (\text{A.10})$$

Für die mit dem IAP-Doppellidar untersuchten Metalle ergeben sich daraus die folgenden Hanle-Faktoren [Alpers, 1993; Alpers et al., 1996]:

$$q(\text{Ca}, 423 \text{ nm}) = 1,499929$$

$$q(\text{Ca}^+, 393 \text{ nm}) = 1,249884$$

$$q(\text{Fe}, 372 \text{ nm}) = 1,0851$$

A.2 Berechnung des effektiven Rückstreuquerschnitts

In Gleichung 2.5 wurde zur Berechnung der Metaldichte der effektive Resonanz-Rückstreuquerschnitt $\sigma_{Res,eff}$ verwendet. Dieser ergibt sich als Faltung des Resonanz-Rückstreuquerschnitts σ_{Res} und der spektralen Form des benutzten Farbstofflasers. Die spektrale Verteilung des Lasers wird vor allem durch das interne Etalon vorgegeben und deswegen durch eine Airy-Funktion beschrieben. Die Faltung aus Airy-Funktion und der Gauß-Funktion des elektronischen Metall-Übergangs ist analytisch nicht lösbar. Deswegen wird zur Beschreibung der Laserlinie mit der vollen Halbwertsbreite $\Delta\lambda_L$ eine Lorentz-Funktion verwendet, die sich nur in den Linienflügeln wesentlich von der Airy-Funktion unterscheidet:

$$L(\lambda) = I_0(\lambda_0) \frac{\left(\frac{\Delta\lambda_L}{2}\right)^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_L}{2}\right)^2} \quad (\text{A.11})$$

Die Faltung der Lorentz-Funktion mit dem Gauß-Profil wird durch eine Voigt-Funktion beschrieben:

$$H(X, Y) = \frac{Y}{\pi} \int \frac{e^{-t^2}}{Y^2 + (X - t)^2} dt \quad (\text{A.12})$$

mit $X = \sqrt{\frac{D}{T}}(\lambda - \lambda_n)$, $Y = \sqrt{\frac{D}{T}} \frac{\Delta\lambda_L}{2}$.

Der effektive Rückstreuquerschnitt ergibt sich damit zu

$$\sigma_{Res,eff}(\Omega, \lambda) = \frac{e^2}{16\pi \epsilon_0 c^2 m_e} \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi T}} \cdot q(\Omega) \cdot f \cdot \lambda_0^2 \cdot H(X, Y) \quad (\text{A.13})$$

In Tab. A.1 werden die atomphysikalischen Daten der genutzten Resonanzübergänge und die Wirkungsquerschnitte zusammengefaßt. Die Werte für Eisen sind *Alpers* [1993] entnommen.

Tab A.1: Atomphysikalische Daten für Ca, Ca⁺ und Fe

	Ca	Ca ⁺	Fe
Grundzustand	4s ² ¹ S ₀	4s ² S _{1/2}	4s ² ⁵ D ₄
angeregter Zustand	4p ¹ P ₁	4p ² P _{3/2}	4p ⁵ F _{5⁰}
Lebensdauer [ns]	4,6	6,2	61,5
Oszillatorenstärke	1,75	0,69	0,0413
Resonanzwellenlänge in Luft [nm]	422,6728	393,3663	371,9937
Hanle-Faktor	1,499929	1,249884	1,0851
dσ _{Ray} /dΩ [10 ⁻³¹ m ² /sr]	1,51	2,01	2,53
dσ _{Res} /dΩ [10 ⁻¹⁶ m ² /sr] ^{a)}	4,17	1,12	0,0815
dσ _{Res,eff} /dΩ [10 ⁻¹⁶ m ² /sr] ^{b)}	2,57	0,76	0,0362 ^{c)}

^{a)} bei 200 K für zirkular polarisiertes Licht

^{b)} bei 200 K für zirkular polarisiertes Licht mit 0,5 pm spektraler Halbwertsbreite

^{c)} Wert aus *Alpers* [1993] für 0,5 pm spektrale Breite korrigiert

A.3 Fehlergrenzen des Meßverfahrens

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bei der Darstellung aller Dichtedaten auf die Beschreibung der Fehlergrenzen verzichtet. Hier werden deshalb die verschiedenen Fehlermöglichkeiten und die Größen des Fehlers genannt. Grundsätzlich besitzt das Lidar-Verfahren zur

Bestimmung der Metalldichte wenig systematische Fehlermöglichkeiten (vgl. Kap. 2). Es dominieren verschiedene zufällige Fehler.

$n_{Am}(r_2)$: Für die Luftdichte in der Normierungshöhe (30 km) liegen keine individuellen Meßwerte vor, sondern aus der Standard-Atmosphäre CIRA 86 [Fleming *et al.*, 1990] interpolierte Werte für das Beobachtungsdatum und die geographische Position des Beobachtungsstandorts. Zusammen mit der natürlichen Variation der Luftdichte in 30 km führt dies zu einem Fehler von ca. 10%.

$\sigma(\lambda)$: Der Resonanz-Rückstreuquerschnitt $\sigma_{Res,eff}(\lambda)$ ist eine Funktion der Temperatur. Diese wird ebenfalls aus der CIRA 86 [Fleming *et al.*, 1990] interpoliert. Die spektrale Lage des Zentrums der Laserlinie wird regelmäßig in der Nacht am Atmosphärensignal überprüft. Beide Fehler zusammen machen rund 10% aus. Demgegenüber vernachlässigbar ist der Fehler in der Berechnung des Rayleigh-Rückstreuquerschnitts $\sigma_{Ray}(\lambda)$.

$I'_{Res}(r_1)$, $I'_{Ray}(r_2)$: Die statistischen Schwankungen in der Zählrate betragen nach Gauß $\Delta I = \sqrt{I+U}$. Der Fehler von $I'_{Res}(r_1)$ liegt in klaren Nächten bei 10%, kann aber abhängig von der Laserenergie, der Transmission der Atmosphäre und der Metalldichte auch schnell anwachsen. Der Fehler von $I'_{Ray}(r_2)$ beträgt dagegen nur 2% oder weniger.

In Alpers [1993] ist die Auswirkung dieser Einzelfehler auf die Dichteberechnung nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz beschrieben. Insgesamt ergibt sich bei einzelnen Profilen (2000 Laserpulse) ein Dichtefehler von rund 25% oder mehr. Durch zeitliche Mittelung und Glättung der Einzelprofile konnte der Fehler z.B. für die in Kap. 4 und 6 gezeigten Seriendarstellungen deutlich reduziert werden. Im Kap. 3 wurden dagegen nur Auswertungen der Nachtmittelprofile gezeigt. Da die statistische Schwankung der Zählrate meist den Hauptfehler ausmacht, liegt der Dichtefehler im Nachtmittel nur bei rund 10% oder weniger. Das gleiche gilt für die Berechnung der Säulendichte aufgrund der Summation über viele Höhenkanäle. Die Betrachtung der Fehler der Berechnung von Metalldichten in Meteorspuren erfolgte bereits im Kap. 4.

Zu weiteren Fehlern führen die Selbstabsorption der Strahlung innerhalb der Metallschicht und die Sättigung der Resonanzübergänge. Beide Effekte sind bei den hier betrachteten Streuquerschnitten und Metalldichten von Ca, Ca⁺ und Fe sowie den eingesetzten Laserenergien vernachlässigbar, müssen bei Na-Sondierungen aber mit wenigen Prozent berücksichtigt werden.

B Übersicht über die Sondierungen

Anhand verschiedener Ca- und Ca⁺-Sondierungen soll das Bild der atmosphärischen Ca- und Ca⁺-Schicht abgerundet werden. Anschließend wird eine Übersicht über die Dauer der Sondierungen in einzelnen Meßnächten, die jeweils mit dem Doppellidar untersuchten Metalle und die mögliche Störung durch sporadische Schichten gegeben.

B.1 Nacht-zu-Nacht-Variationen der Ca-Schicht

Zwischen dem 6. und 10. Juli 1997 wurden z.B. in drei von vier aufeinander folgenden Nächten Ca-Sondierungen jeweils über 2,5 bis 3 Stunden durchgeführt. Längere Sondierungen sind zu dieser Jahreszeit nicht möglich. Die einzelnen Profile der Ca-Sondierungen sind in Abb. B.1 dargestellt. Von Veränderungen innerhalb der Nacht abgesehen, erhöhte sich die Ca-Dichte im Schichtmaximum innerhalb von zwei Tagen von 6./7. Juli zum 8./9. Juli von 13 cm^{-3} auf ca. 100 cm^{-3} . Dieses Niveau wurde jedoch nicht gehalten, so daß in der Nacht 9./10. Juli nur noch eine maximale Dichte von 28 cm^{-3} beobachtet wurde. Diese Dichteänderungen spiegeln sich auch in der Säulendichte wieder. Im Nachtmittel der drei Sondierungen stieg die Säulendichte zunächst von $1,2 \cdot 10^7 \text{ Atome/cm}^2$ auf $6,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ und fiel zum 9./10.7. wieder auf $1,7 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$. Wie in Abb. B.1 zu erkennen, schwankten die Säulendichte und auch die Maximaldichte innerhalb der einzelnen Nächte deutlich weniger als von Nacht zu Nacht. Die Variationen sind also keine Fortsetzung der nächtlichen Schwankungen, sondern werden zumindest in diesem Fall durch Prozesse am Tage hervorgerufen. In verschiedenen anderen Sondierungen ergaben sich jedoch auch innerhalb einer Nacht sehr große Veränderungen der Schichtform und Metalldichte. Um ein *repräsentatives* Bild der Ca-Schicht zu erhalten, sind also immer Mittelungen über eine Nacht, besser über mehrere Nächte notwendig.

Am 6./7. Juli wurde unterhalb der Metallschicht zwischen 81,5 und 83,5 km Höhe zeitweise ein weiterer Bereich erhöhter Rückstreuung beobachtet, die beim Verstimmen des Lasers auf eine Nicht-Resonanz-Wellenlänge erhalten blieb. Es handelte sich daher um Mie-Streuung, deren Rückstreuquerschnitt sehr viel größer ist als der von Rayleigh-Streuung (siehe Abschnitt 2.1). Ursache waren sog. *Leuchtende Nachtwolken* (*Noctilucent Clouds, NLC*). Diese mesosphärischen Wolken bestehen vermutlich aus Wassereis-Kristallen und werden im Sommer vor allem in polaren Breiten beobachtet [von Cossart et al., 1997]. Am Standort Kühlungsborn können sie sich normalerweise aufgrund zu hoher mittlerer Temperaturen nicht bilden. Durch atmosphärische Wellen können sie jedoch aus kälteren Gebieten herantransportiert werden und sind dann für das Lidar meßbar [Alpers et al., 1999b].

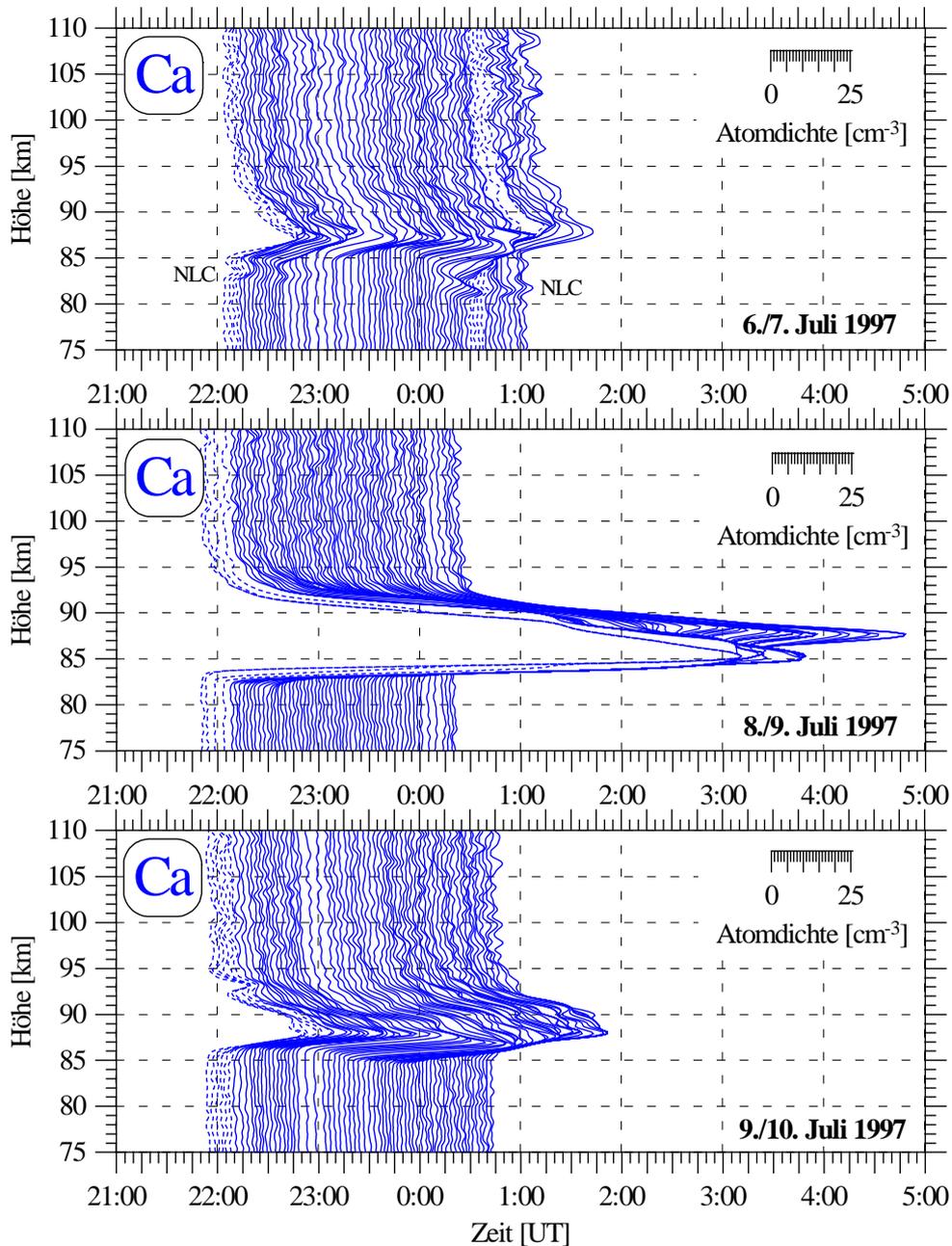


Abb. B.1: Serieldarstellung der Ca-Sondierungen vom 6./7., 8./9. und 9./10. Juli 1997. Jede Kurve repräsentiert ein Dichteprofil nach ca. 2 min Integrationszeit. Die Auslenkung beschreibt die beobachtete Metall-Dichte in Atome/cm^3 , die Null-Linie wird durch die Uhrzeit der Datenaufnahme festgelegt. Jedes Profil ist mit einem laufenden Hanning-Filter über 1,8 km mit 200 m Schrittweite geglättet [Press *et al.*, 1992] sowie zeitlich über drei Profile mit einer Schrittweite von einem Profil gemittelt. Während der Aufnahme der gestrichelten Profile war der Laser noch nicht genau auf die Resonanzwellenlänge von Ca abgestimmt.

Parallel zu Calcium wurden in der zweiten und dritten Nacht Ca^+ -Ionen beobachtet. Abb. B.2 zeigt die Nachtmittel der Ca^+ -Ionenschicht für die beiden Nächte. Man erkennt in beiden Nächten eine relativ geringe Konzentration an Ca^+ in der Höhe der neutralen Schicht. In der Nacht 8./9. Juli 1997 wurde außerdem eine sporadische Ca^+ -Schicht in ca. 105 km Höhe beobachtet. Diese Schicht war fast über die gesamte Nacht vorhanden, änderte jedoch ständig Höhe, Breite und Maximal-Konzentration. Anzeichen für sporadische Schichten neutralen Calciums fehlen aber.

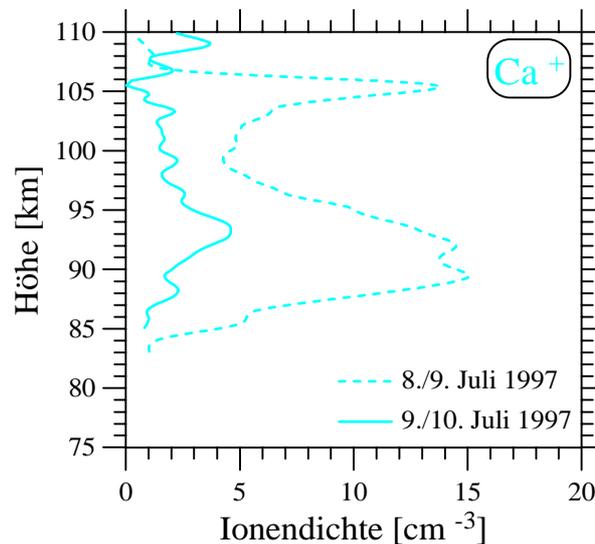


Abb. B.2: Ca^+ -Nachtmittelprofile vom 8./9. und 9./10. Juli 1997. Die Profile sind über 1,8 km laufend geglättet (Hanning-Filter).

B.2 Beispiele für sporadische Ca- und Ca^+ -Schichten

Die folgenden Abbildungen enthalten weitere Beispiele für sporadische Schichten von Calcium-Atomen und -Ionen, die im Kap. 6 beschrieben wurden. Die Bildunterschriften enthalten jeweils die wesentlichen Informationen zu den gezeigten Schichten. In allen Figuren wurden die Profile vertikal über 1,8 km mit einem laufenden Hanning-Filter geglättet [Press *et al.*, 1992] und über drei Profile arithmetisch gemittelt (Schrittweite 1 Profil). Die Skalierungen der verschiedenen Achsen sind aus einem Satz von Standardwerten so gewählt, daß die Schichten möglichst gut abgebildet werden.

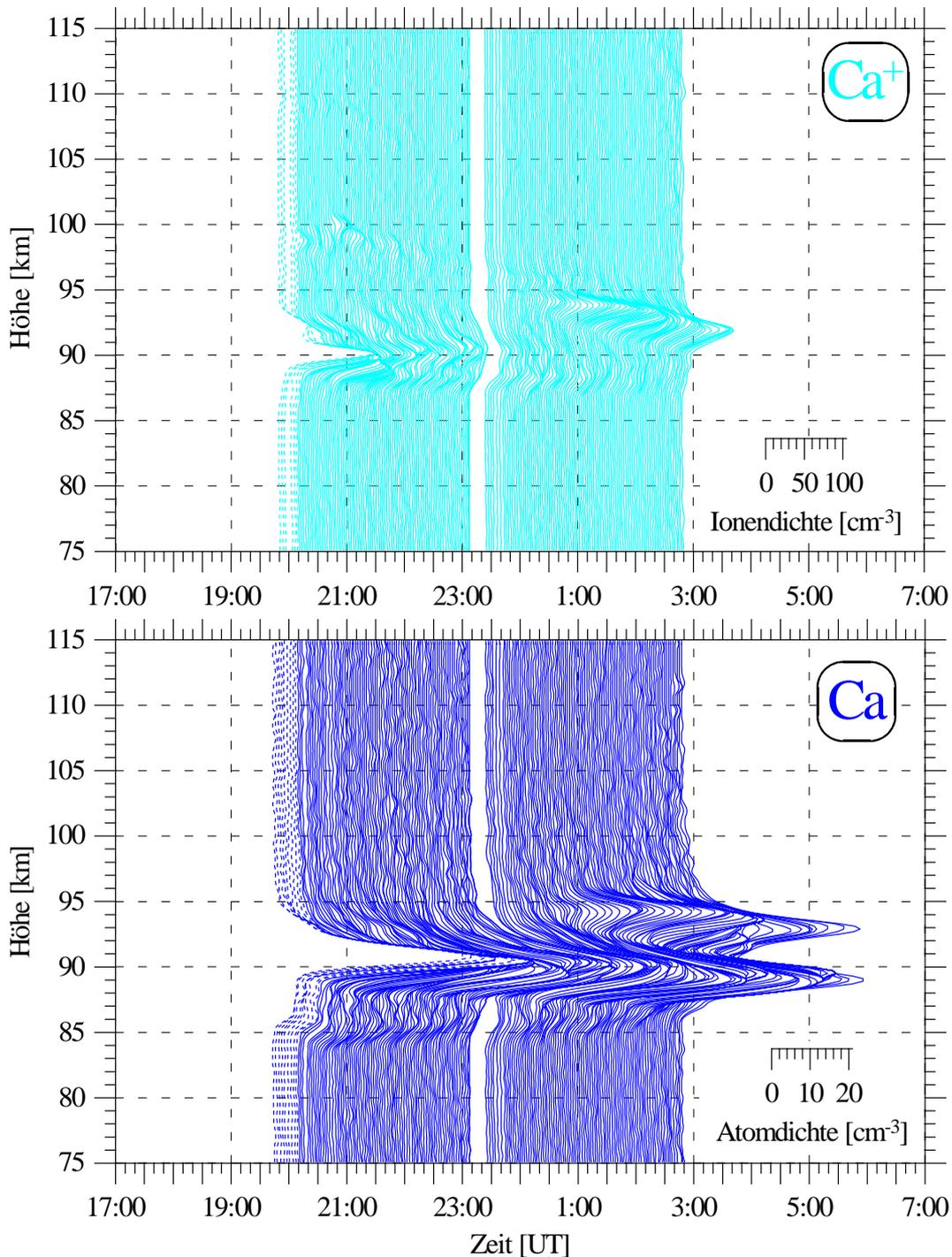


Abb. B.3: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 15./16. April 1997 mit korrelierten $\text{Ca}_s/\text{Ca}^+_s$: Zu Beginn der Sondierung wird eine schwache sporadische Ca^+ -Ionenschicht (110 cm^{-3}) in ca. 90 km Höhe detektiert, deren Dichte nachfolgend weiter abnimmt. Gegen 0:30 UT entsteht eine neue Ca^+_s in 94 km Höhe, die bis Ende der Sondierung bis auf 92 km absinkt und Konzentrationen von ca. 70 cm^{-3} erreicht. Die ganze Zeit über wird auch eine neutrale sporadische Schicht um 90 km Höhe beobachtet, die mit rund 60 cm^{-3} sehr viel konzentrierter ist als die bis ca. 85 km Höhe herabreichende permanente Schicht ($6\text{-}10 \text{ cm}^{-3}$). Gleichzeitig mit der Ca^+ -Ionenschicht entsteht um 0:30 UT in gleicher Höhe eine neutrale sporadische Schicht, die auch bis Ende der Sondierung gegen 2:50 UT mit der Ca^+_s in Höhe und Dichteverlauf korreliert.

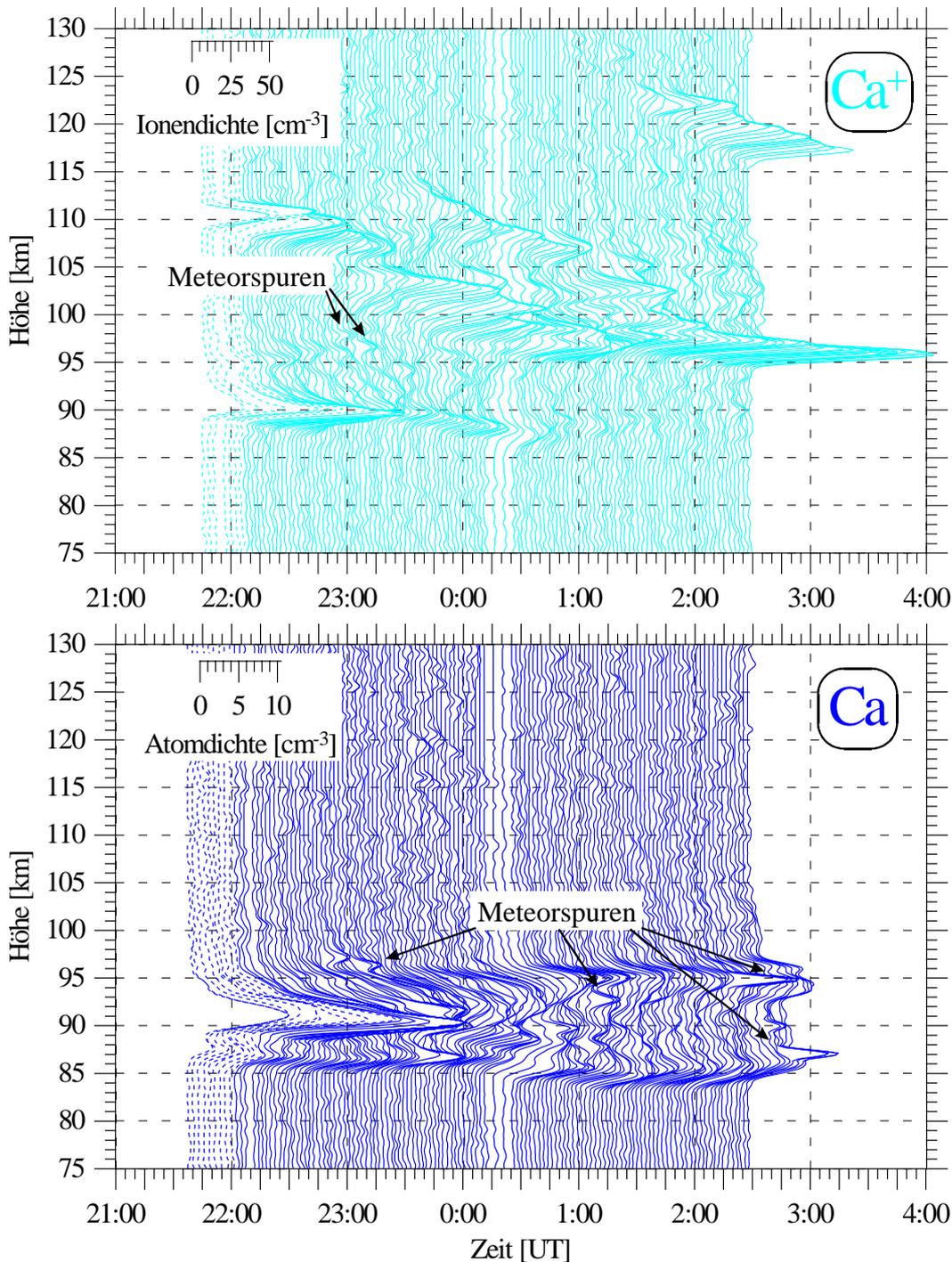


Abb. B.4: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 22./23. April 1997 mit alleinigen Ca^+_s und Meteorspuren: Man erkennt verschiedene sporadische Ca^+ -Schichten, die z.T. über die gesamte Nacht hinweg absinken. Die Ca^+_s bei 90 km korreliert z.T. mit lokalen Dichtemaxima der neutralen Schicht. Die Ca^+_s oberhalb von 100 km mit Konzentrationen bis ca. 60 cm^{-3} korrelieren dagegen nicht mit neutralen sporadischen Ca-Schichten. Nur in der Höhe der mit z.T. mehr als 100 Ionen/ cm^3 stärksten Ca^+_s finden sich gegen Ende der Sondierung in 95 km Höhe schwache lokale Ca-Maxima. In den Ca-Profilen sind verschiedene Meteorspuren in Form kurzzeitiger Dichtemaxima zu erkennen. Zu den Zeiten der beiden schwächeren Ca-Spuren gegen 22:45 UT (97 km) und 23:00 UT (96,2 km) sind jeweils um einen Kilometer nach oben verschoben auch zwei Ca^+ -Spuren schwach erkennbar. Wahrscheinlich stammen die Ionen aber trotzdem aus dem gleichen Meteoroiden wie das neutrale Ca, wurden aber in der kurzen Zeit seit dem Verdampfen durch Lorentz-Kräfte ca. 1 km nach oben transportiert.

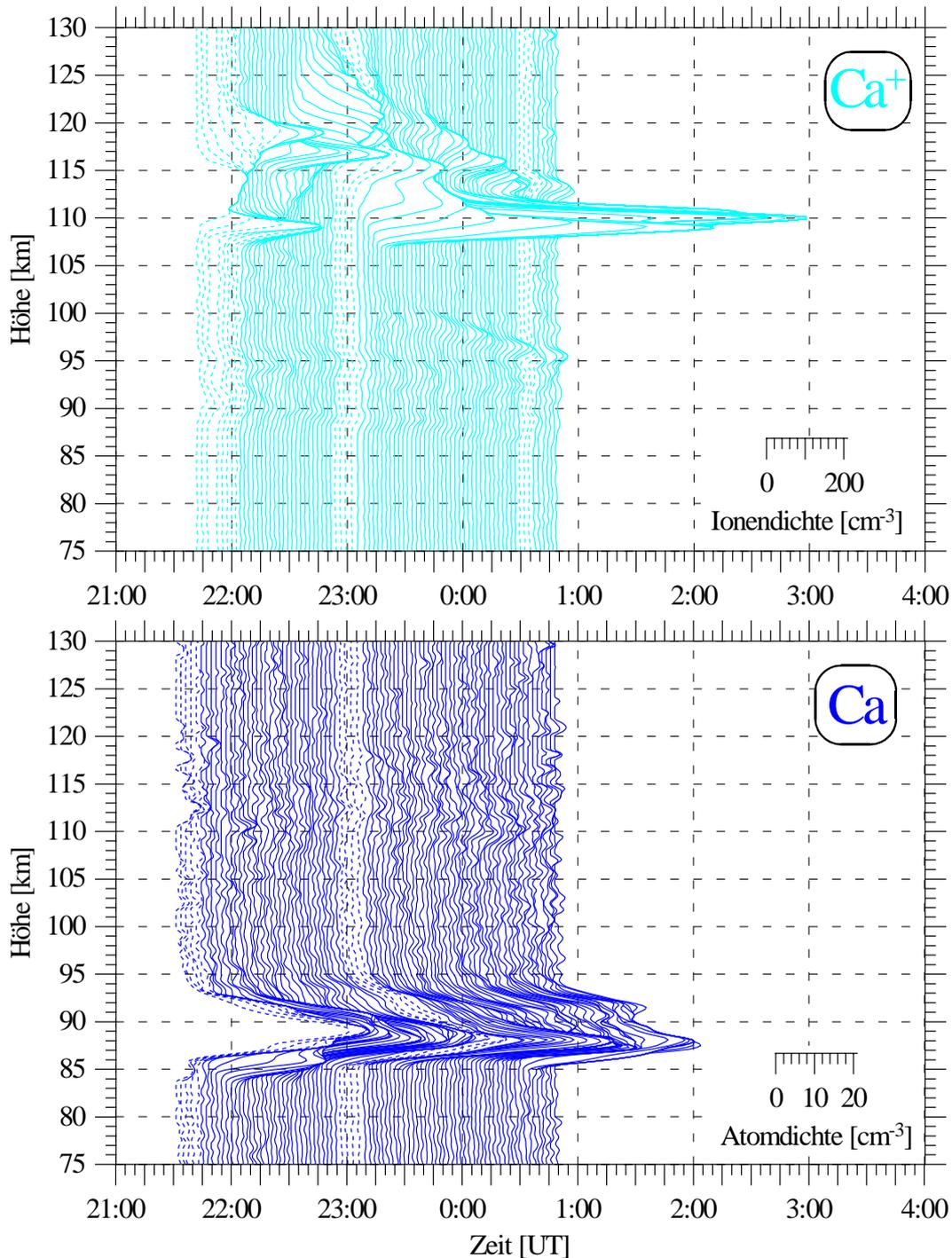


Abb. B. 5: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 6./7. Juni 1997 mit alleiniger starker Ca^+ über 100 km: Die Ca^+ -Profile zeigen eine starke, in der Höhe und Konzentration sehr variable Ionenschicht oberhalb von 105 km. Die Teilchenzahldichte erreicht zwischen 23:20 und 23:45 UT Werte von mehr als 1000 cm^{-3} in ca. 110 km Höhe, ab 0:20 UT werden überall nicht mehr als 100 Ionen/cm^3 gemessen. Zwischen 87 und 100 km befinden sich verschiedene schwache, weniger variable Ca^+ -Ionenschichten von bis zu 50 cm^{-3} . In den Profilen des neutralen Ca erkennt man trotz der hohen Ionendichte nur ein schwaches Metallsignal (höchstens 4 cm^{-3}) oberhalb von 105 km, daß sich kaum vom Rauschniveau (oberhalb von 120 km) abhebt.

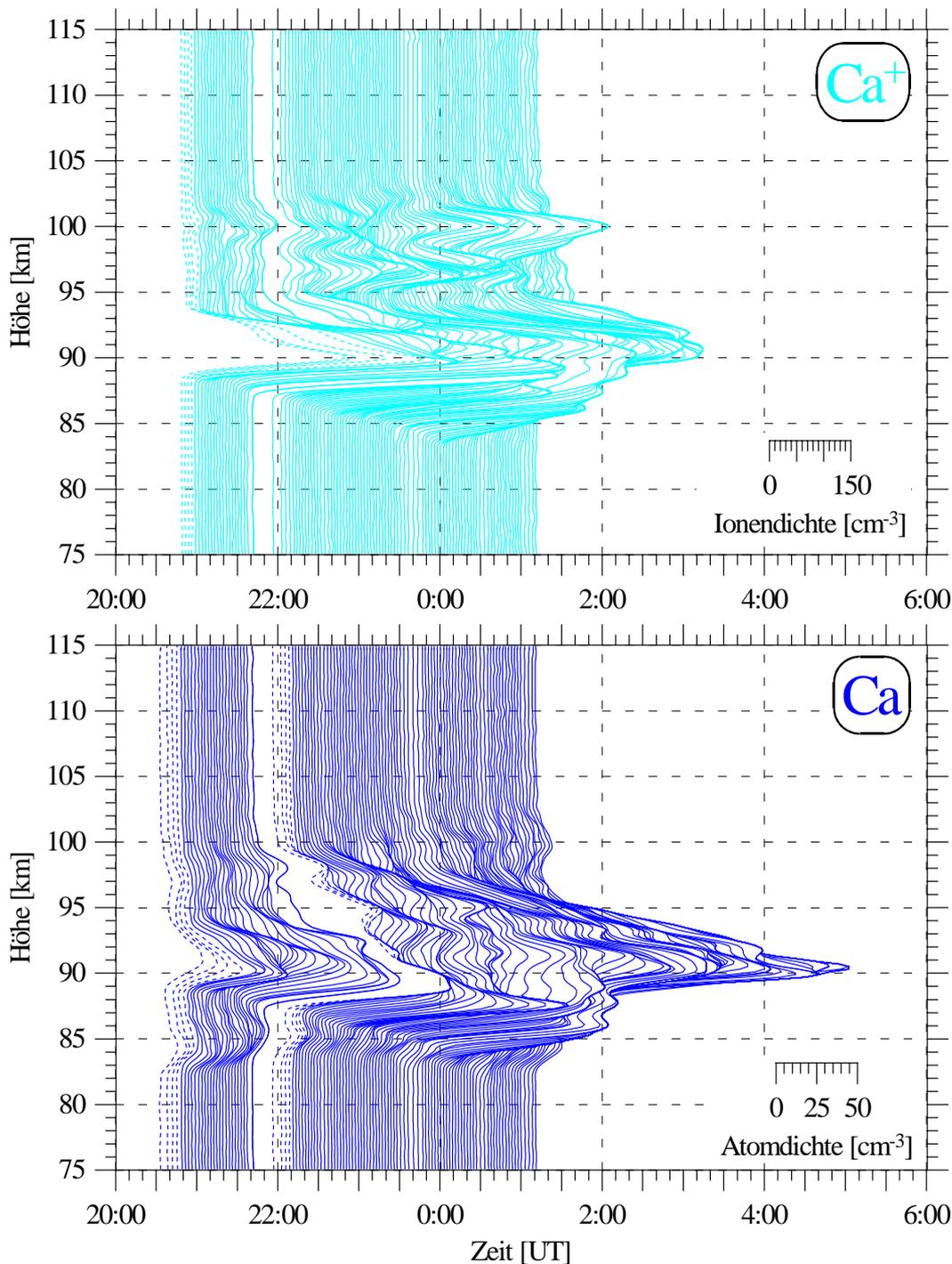


Abb. B.6: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 14./15. September 1998 mit teilweise korrelierten, sehr variablen Ca - und Ca^+ -Schichten: In den Ca^+ -Profilen erkennt man eine sehr starke sporadische Schicht um 90 km, deren Unterkante im Verlauf der Sondierung bis auf 85 km absank. In keiner anderen Nacht wurde in dieser geringen Höhe eine vergleichbare Ionen-Konzentration gemessen. Die neutrale Ca -Schicht ist in dieser Nacht sehr variabel mit einem permanenten Sockel von ca. 10 cm^{-3} und einer sporadischen Schicht mit bis zu mehr als $150 \text{ Atomen}/\text{cm}^3$. In der Höhe der ab 23:30 UT in 100 km Höhe sichtbaren Ca^+ s werden gegen Ende der Sondierung leichte Anreicherungen von neutralem Ca beobachtet, die jedoch für die Einordnung als „sporadische Schicht“ viel zu gering sind. Nach 0:15 UT verschiebt sich die Unterkante der sporadischen Ca - und Ca^+ -Schichten sprunghaft um ca. 4 km nach oben.

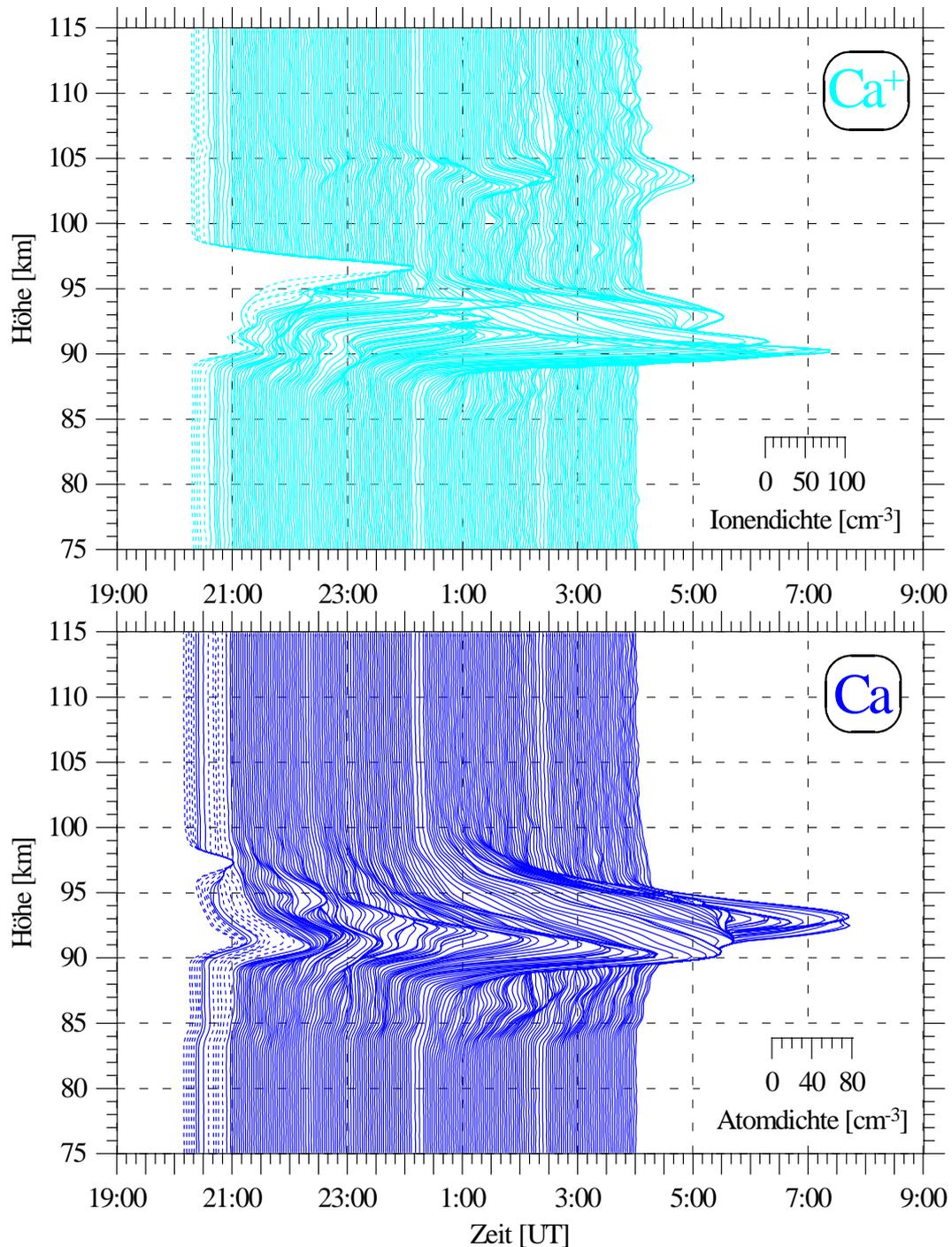


Abb. B.7: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 24./25.9.1997 mit korrelierten sporadischen Ca - und Ca^+ -Schichten: Die Ca^+ -Profile zeigen zu Beginn der Sondierung ein Maximum in ca. 97 km Höhe sowie ein schwächeres in ca. 90 km Höhe, das nach ca. 2 h vollständig verschwunden ist. Bis 0 UT bewegt sich das Maximum der Schicht bis ca. 90 km herunter und wird später wieder in ca. 93 km Höhe beobachtet. Die Teilchenzahldichte steigt bis 0 UT auf ca. 500 cm^{-3} , liegt am Ende aber wieder bei ca. 100 cm^{-3} . Ab ca. 22:30 UT wird eine schwache Ca^+_s zwischen 103 und 105 km Höhe beobachtet. In der Höhe dieser Ionenschicht findet sich kein neutrales Ca . Die tiefe Ca^+_s korreliert aber in Höhe und Dichteänderungen mit einer sporadischen Schicht des neutralen Calciums. Die permanente Ca -Schicht ist bei Dichten von höchstens 20 cm^{-3} in der Abbildung kaum zu erkennen, die Ca_s erreicht eine Dichte von ca. 280 cm^{-3} gegen 0:30 UT. Zu diesem Zeitpunkt ist die Ionenkonzentration in gleicher Höhe fast doppelt so groß, sie nimmt aber bis zum Morgen auf die Hälfte des zugehörigen Ca -Wertes ab.

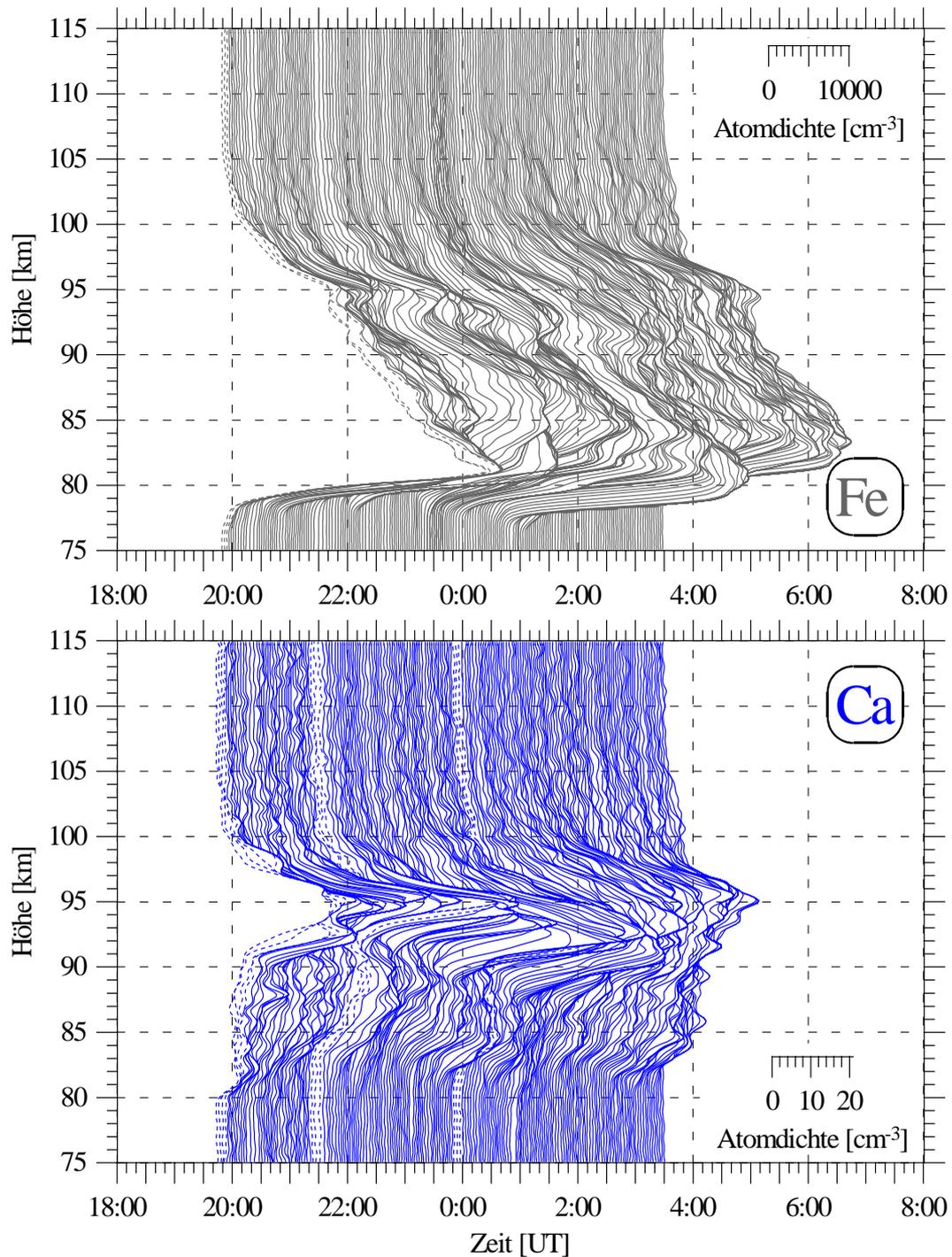


Abb. B.8: Ca/Fe-Sondierung in der Nacht 21./22. November 1998 mit unterschiedlichen Schichtprofilen und zeitlichen Variationen: In den Ca-Profilen erkennt man eine in ca. 83 km Höhe beginnende permanente Schicht sowie eine zu Beginn um 95 km zentrierte, mit 30-40 cm⁻³ sehr viel höher konzentrierte Schicht. Die gesamte Schicht zeigt ungewöhnliche, kurzzeitige Variationen von Profil zu Profil, die nicht durch eine zu geringe Signalstärke hervorgerufen werden (vgl. Untergrundsignal bis 80 km und oberhalb von 105 km). Diese Variationen sind in den Fe-Profilen schwächer ausgeprägt. In der Höhe der Ca-Anreicherung erkennt man in den Fe-Profilen nur ein schwaches lokales Dichtemaximum, die Fe-Konzentration beträgt dort aber nur rund die Hälfte der Maximalkonzentration. Die unterschiedlichen Ausprägungen dieser „Schicht“ müssen chemisch verursacht sein, da auf beide Metalle die gleichen dynamischen Prozesse und adiabatischen Temperaturänderungen wirken.

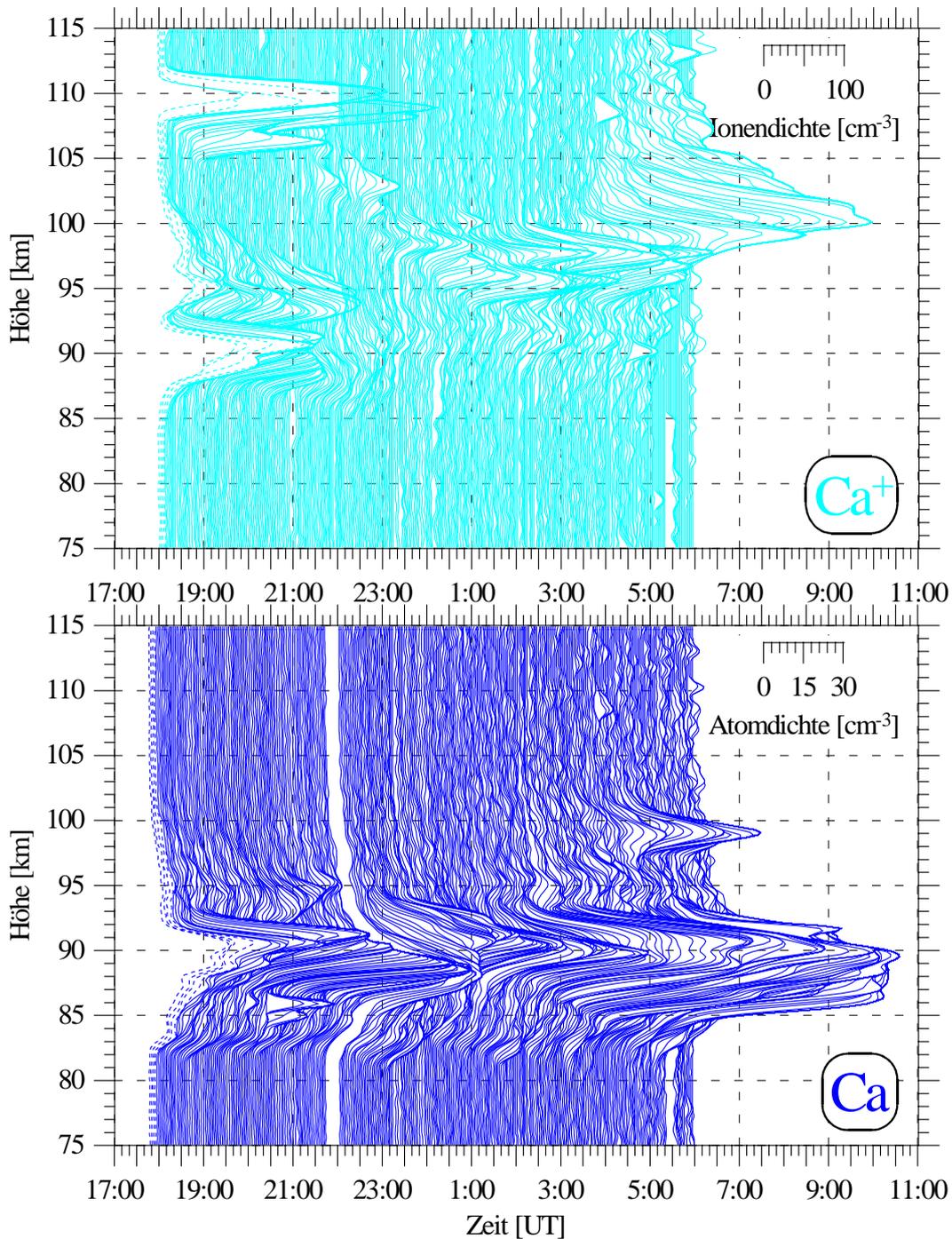


Abb. B.9: Ca/Ca^+ -Sondierung in der Nacht 8./9.12.1998 mit teilweise korrelierten sporadischen Schichten: Zu Beginn der Sondierung werden Ca^+ -Profile mit drei lokalen Dichtemaxima aufgenommen. Alle drei sporadischen Schichten nehmen bis 22 UT an Dichte ab. Gegen 23 UT bildet sich in rund 98 km ein Maximum heraus, das sich bis ca. 200 cm^{-3} verstärkt und gegen Morgen eine scharfe Unterkante besitzt, aber an der Oberseite nur einen ungewöhnlich schwachen Gradienten ausbildet. Beim neutralen Calcium wird zu Beginn eine sporadische Schicht (60 cm^{-3}) auf einer permanenten Schicht von $10\text{-}15 \text{ cm}^{-3}$ beobachtet. Die Höhe korreliert mit dem unteren Ca^+ -Maximum, während in Höhe des mittleren, nur wenig schwächeren Ca^+ -Maximums eine nur geringe Ca-Anreicherung zu erkennen ist. Nach Verschwinden der Ionen um 90 km nimmt die Mächtigkeit der neutralen Schicht noch mehrere Stunden zu. Im Höhenbereich der Ca^+_s bildet sich ab 4 UT auch eine neutrale Ca_s (99 km). Die Ionenschicht befindet sich zu diesem Zeitpunkt ca. 1 km höher und nimmt noch an Dichte zu. Während der gesamten Nacht werden starke Höhenvariationen der Ca und Ca^+ -Schicht beobachtet.

B.3 Der Jahresgang der ungestörten Ca-Schicht

In Abb. 3.1 wurde aus allen 112 Ca-Sondierungen am Standort Kühlungsborn ein Jahresgang gebildet. Man erkennt dort ein Sommermaximum mit einer Konzentration bis zu 30 cm^{-3} (87,5 km) und ein Herbstmaximum mit mehr als 40 cm^{-3} (91 km Höhe). Auch bei Unterdrückung der Nächte mit sporadischen Schichten bildet sich ein ähnlicher Jahresgang mit Maxima im Sommer und Herbst (Abb. B.10). Im Sommer werden etwas höhere Konzentrationen erreicht. Ohne sporadische Schichten wird das Herbstmaximum fast 2 km tiefer und rund 1,5 Monate später beobachtet und ist etwas weniger ausgeprägt. Aus der am unteren Bildrand sichtbaren zeitlichen Verteilung der Sondierungen erkennt man die Dominanz sporadischer Schichten im Oktober bis Dezember. Mittelung und Interpolation der Nachtmittelprofile entsprechen der Darstellung zu Abb. 3.1.

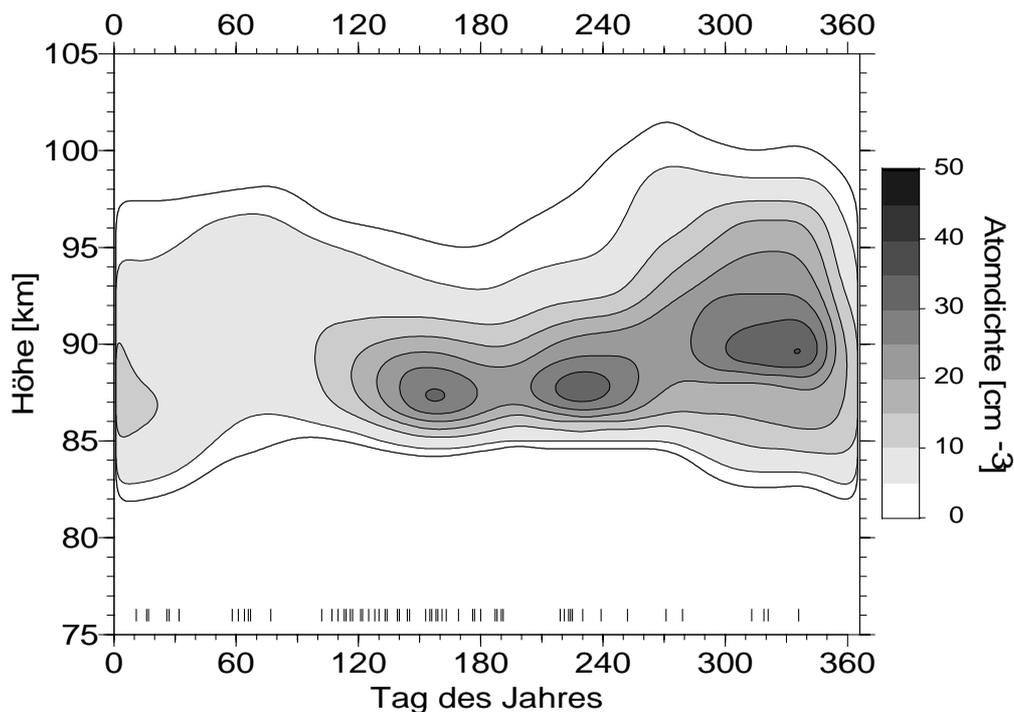


Abb. B.10: Jahreszeitliche Variationen der Ca-Schicht. Die einzelnen Sondierungen wurden mit einem 91-Tage-Hanning-Filter interpoliert und in der Höhe über 1,8 km geglättet. Die Linien über der Abszisse markieren die einzelnen Sondierungen (66 Nächte ohne sporadische Schichten).

B.4 Statistik der Messungen

Im Abschnitt 3.2.1 wurden das mittlere Profil der Ca-Schicht aus allen 66 Sondierungen ohne sporadische Schichten sowie die einzelnen Quartalsmittel gegenübergestellt. Abb. B.11 zeigt die entsprechenden Mittel aus allen 112 Ca-Sondierungen, sowie zum Vergleich noch einmal die Profile ohne starke sporadische Schichten. Man erkennt die nahezu identischen Schichtunterkanten und die Ca-Anreicherungen durch Ca_s oberhalb von 90 km. Die Tabelle B.1 gibt auf den folgenden Seiten eine Übersicht über alle Sondierungen des IAP-Doppellidars mit den jeweiligen Nachtmittelwerten.

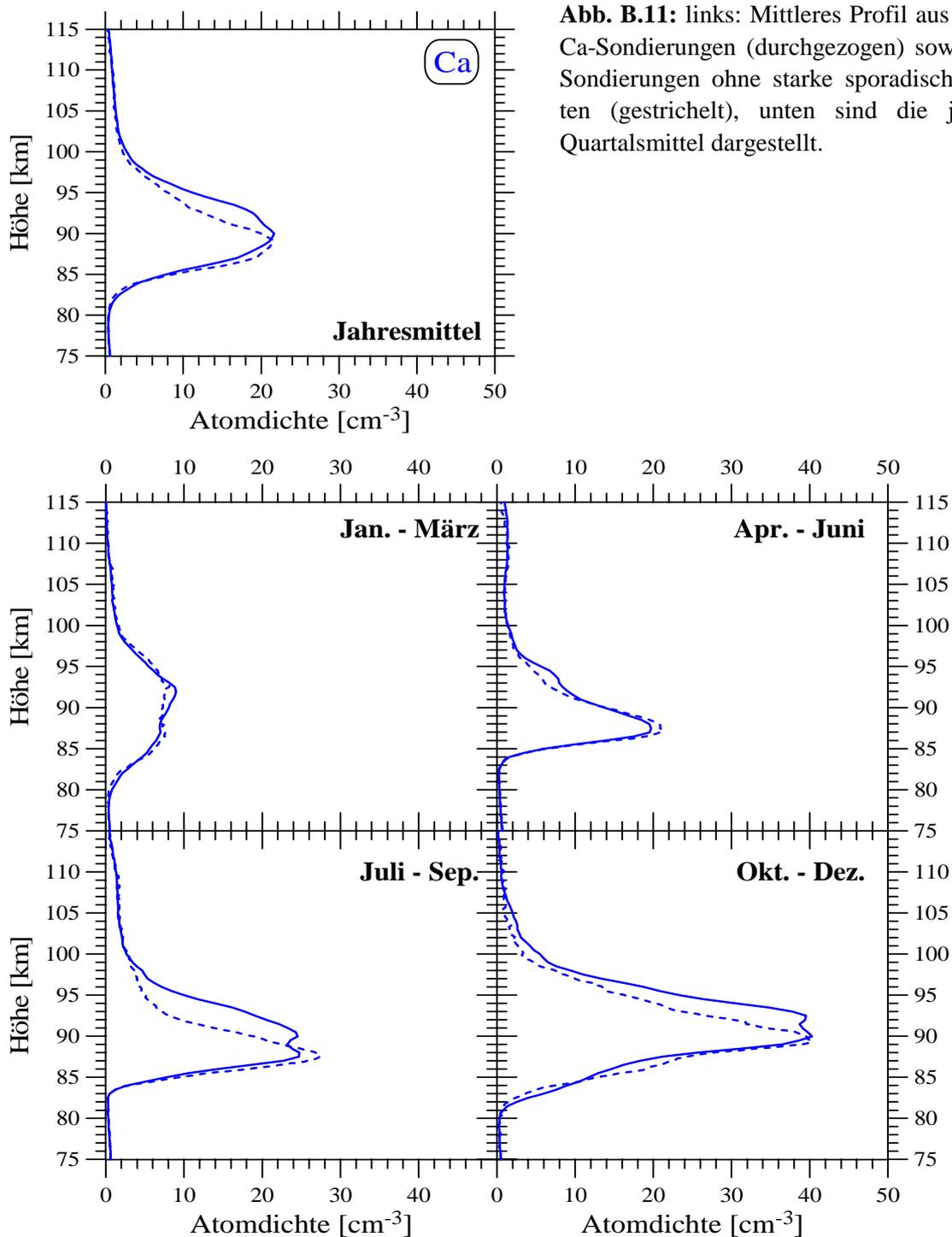


Abb. B.11: links: Mittleres Profil aus allen 112 Ca-Sondierungen (durchgezogen) sowie aus 66 Sondierungen ohne starke sporadische Schichten (gestrichelt), unten sind die jeweiligen Quartalsmittel dargestellt.

Tab. B.1: Übersicht über die Sondierungen des IAP-Doppellidars mit den jeweiligen Nachtmittelwerten. Die Na-Dichten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig ausgewertet. Kursiv geschriebene Ca-Daten bezeichnen Nächte mit starken sporadischen Schichten. Das Datum bezeichnet den Morgen der Nacht.

Datum	Metall 1	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]	Metall 2	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]
16.12.96	Ca	23:45:58 04:23:19	9,2	109	89,7	7,2						
04.01.97	Ca	22:15:19 05:23:03	2,4	21	87,7	11,2						
05.01.97	Ca	22:17:00 23:40:44	1,7	19	90,5	4,8						
08.01.97	Ca	16:50:03 22:15:12	1,2	11	91,3	8,6						
16.01.97	Ca	19:08:41 01:45:10	1,7	17	86,3	8,4						
17.01.97	Ca	17:01:20 21:48:50	1,9	15	84,7	10,0						
26.01.97	Ca	18:06:57 05:50:32	1,5	11	89,7	12,8	Ca ⁺	21:24:55 05:50:32	2,8	27	94,7	5,6
27.01.97	Ca	17:54:02 05:15:56	0,9	8	90,1	9,4	Ca ⁺	18:17:35 05:15:56	1,0	12	109,3	4,0
31.01.97	Ca	17:31:02 21:40:23	1,0	9	89,5	10,6	Ca ⁺	18:01:57 21:40:23	0,7	5	89,5	
01.02.97	Ca	17:36:06 21:17:58	1,1	10	86,7	13,2	Ca ⁺	17:54:57 21:17:58	2,0	32	95,3	11,8
06.02.97	Ca	18:10:20 21:02:27	1,0	12	91,9	4,8	Ca ⁺	18:21:58 21:02:27	2,0	65	91,7	1,6
27.02.97	Ca	22:17:20 01:52:34	1,3	13	94,3	6,8	Ca ⁺	23:34:57 01:52:34	3,2	41	103,5	9,6
28.02.97	Ca	18:09:42 00:50:32	0,7	7	92,5	6,0	Ca ⁺	18:16:06 00:50:32	1,8	24	109,9	19,0
05.03.97	Ca	18:27:37 04:48:05	1,1	10	93,5	10,6	Ca ⁺	18:32:43 04:48:05	1,8	23	94,1	4,8
07.03.97	Ca	18:28:27 04:34:44	1,7	15	93,9	8,4	Ca ⁺	19:16:49 04:34:44	2,1	20	94,9	7,8
08.03.97	Ca	18:35:12 23:20:11	0,7	5	86,1	12,8	Ca ⁺	19:03:09 23:20:11	1,8	58	109,3	1,4
10.03.97	Ca	19:38:13 04:27:03	0,8	6	92,1	11,4	Ca ⁺	20:12:46 04:27:03	1,1	10	102,7	11,0
18.03.97	Ca	19:10:18 04:07:37	1,0	10	92,5	8,2	Ca ⁺	19:17:48 04:07:37	2,1	25	100,5	3,8
02.04.97	Ca	21:42:03 00:02:18	1,6	21	93,5	6,4	Ca ⁺	22:07:11 00:02:18	6,4	113	94,1	5,8
05.04.97	Ca	21:14:16 22:50:46	0,9	13	93,7	3,4	Ca ⁺	21:30:46 22:50:46	2,0	62	100,5	0,6
08.04.97	Ca	19:26:08 22:57:56	2,2	58	93,5	3,0	Ca ⁺	19:37:01 22:57:56	3,1	104	94,1	2,2
12.04.97	Ca	20:35:47 02:58:24	1,2	11	90,9	10,8	Ca ⁺	21:01:06 02:58:24	1,9	25	98,7	5,6
16.04.97	Ca	19:39:04 02:50:40	1,7	37	90,1	2,8	Ca ⁺	19:44:41 02:50:40	1,9	30	89,9	5,6
17.04.97	Ca	19:44:37 21:24:15	0,7	6	85,7	10,6	Ca ⁺	20:01:07 21:22:01	1,6	22	96,9	3,2
18.04.97	Ca	20:10:26 23:36:25	0,7	8	91,9	6,4	Ca ⁺	20:43:02 23:36:25	2,2	39	98,7	5,6
20.04.97	Ca	21:56:46 02:55:04	1,1	9	94,1	12,2	Ca ⁺	22:07:19 02:55:04	1,8	20	94,3	20,6
21.04.97	Ca	20:08:12 23:30:37	0,9	10	91,3	7,2	Ca ⁺	20:26:29 23:30:37	2,3	32	105,5	10,0
23.04.97	Ca	21:33:21 02:30:34	1,7	19	90,5	9,4	Ca ⁺	21:40:58 02:30:34	3,7	32	96,3	13,8
26.04.97	Ca	20:31:30 02:21:58	1,1	13	89,5	6,6	Ca ⁺	20:44:33 21:11:49	1,6	28	90,5	32,2
27.04.97	Ca	20:15:20 01:51:30	1,0	10	92,3	9,2	Fe	21:38:05 02:21:58	765	8500	88,9	9,8
01.05.97	Ca	21:19:38 21:59:31	1,1	14	84,7	6,8	Fe	20:26:17 01:51:30	617	6500	87,5	9,8
08.05.97	Ca	21:01:20 02:00:06	1,4	18	89,9	5,0	Fe	21:27:25 21:59:31	1011	12700	84,1	8,8
13.05.97	Ca	23:42:25 01:40:48	1,8	29	87,1	4,6	Fe	21:07:05 02:00:06	765	8900	89,7	6,8
14.05.97	Ca	21:59:42 01:42:56	3,0	50	91,7	4,4	Ca ⁺	23:22:52 01:40:48	860	10600	88,9	7,4
								22:16:19 01:42:56	7,2	110	93,7	11,2

Tab. B.1 (Forts.): Übersicht über die Sondierungen des IAP-Doppellidars mit den jeweiligen Nachtmittelwerten.

Datum	Metall 1	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10 ⁷ cm ⁻²]	Maximal- dichte [cm ⁻³]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]	Metall 2	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10 ⁷ cm ⁻²]	Maximal- dichte [cm ⁻³]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]
24.05.97	Ca	21:48:21 00:07:17	1,5	30	86,7	3,4	Ca ⁺	22:36:16 00:07:17	3,3	140	98,9	1,4
25.05.97	Ca	21:13:22 01:19:30	2,0	27	86,7	5,8	Ca ⁺	21:16:54 01:19:30	4,0	27	107,3	17,0
02.06.97	Ca	21:56:06 01:12:52	2,9	52	86,9	5,2	Fe	22:21:39 23:08:48	410	9500	87,9	4,6
04.06.97	Ca	22:24:27 23:57:34	2,4	58	87,1	3,6	Fe	23:08:51 23:57:34	829	15200	87,3	5,2
05.06.97	Ca	21:43:45 00:53:02	3,9	42	86,3	5,0	Ca ⁺	21:59:58 00:53:02	16,3	315	109,7	2,0
07.06.97	Ca	21:27:32 00:51:21	2,1	40	88,1	4,4	Ca ⁺	21:37:56 00:51:21	12,9	289	110,1	2,0
08.06.97	Ca	22:02:11 00:43:47	1,4	27	87,3	3,8	Ca ⁺	22:10:11 00:43:47	3,0	64	107,7	4,8
10.06.97	Ca	22:32:47 00:55:58	5,1	135	86,3	2,4	Ca ⁺	22:58:43 00:55:58	2,2	56	97,7	2,4
12.06.97	Ca	21:40:51 00:42:09	1,5	28	88,1	4,2	Ca ⁺	22:05:37 00:42:09	2,4	23	105,7	8,4
26.06.97	Ca	21:42:05 00:43:53	1,8	24	87,3	4,8	Fe	22:26:07 00:43:53	709	6300	88,3	12,4
05.07.97	Ca	22:54:05 23:54:37	1,2	16	93,7	8,0	Ca ⁺	23:11:01 23:54:37	4,5	61	96,9	6,2
06.07.97	Ca	21:52:22 23:13:21	1,5	25	87,7	4,4	Ca ⁺	22:01:44 23:13:21	2,8	79	99,1	1,2
07.07.97	Ca	21:59:35 01:04:03	1,2	14	87,5	5,4						
09.07.97	Ca	21:45:58 00:22:56	6,2	104	87,3	5,8	Ca ⁺	22:03:51 00:22:56	2,4	17	105,3	18,6
10.07.97	Ca	21:49:53 00:45:45	1,7	31	87,7	4,2	Ca ⁺	23:07:53 00:45:45	1,1	8	72,1	3,0
02.08.97	Ca	21:27:10 01:56:50	2,5	19	87,9	5,6	Ca ⁺	21:37:23 01:56:50	9,7	201	102,1	7,8
06.08.97	Ca	21:18:25 01:57:44	1,3	14	88,1	5,8	Fe	22:16:24 01:57:44	940	10300	88,5	6,6
07.08.97	Ca	21:07:42 02:07:19	3,2	62	87,7	3,8	Fe	21:17:26 02:07:19	1048	15100	88,9	9,6
08.08.97	Ca	20:48:07 01:31:26	2,8	52	93,1	3,2	Fe	21:27:43 01:31:26	993	9900	92,9	7,6
09.08.97	Ca	21:31:47 02:05:53	2,6	37	86,5	5,4	Fe	22:50:08 02:05:53	854	9300	87,3	8,4
10.08.97	Ca	21:09:34 02:43:28	2,7	22	96,5	13,6	Fe	21:35:21 02:43:28	747	8000	86,5	6,6
11.08.97	Ca	20:53:50 02:08:28	1,6	22	86,9	5,2	Fe	21:33:17 02:08:28	478	6000	86,3	7,0
12.08.97	Ca	20:51:43 02:23:03	1,8	21	88,5	6,0	Fe	21:06:25 02:23:03	735	9000	86,9	5,8
13.08.97	Ca	20:54:46 01:58:57	3,1	39	87,5	4,2	Fe	21:09:29 01:58:57	1038	12100	87,5	3,8
14.08.97	Ca	20:27:02 02:17:54	1,6	12	89,7	5,6	Ca ⁺	23:30:30 02:17:54	4,4	61	101,3	1,6
18.08.97	Ca	20:55:00 01:12:17	1,9	27	87,1	5,6	Ca ⁺	22:11:11 01:12:17	3,6	68	109,5	1,6
19.09.97	Ca	19:53:23 22:18:55	1,3	20	87,3	3,0	Ca ⁺	20:17:07 22:18:55	4,8	153	103,1	4,8
25.09.97	Ca	20:05:41 04:03:45	7,1	118	92,7	5,0	Ca ⁺	20:13:50 04:03:45	6,3	107	90,7	8,2
26.09.97	Ca	18:46:10 01:03:07	3,2	52	91,7	4,4	Fe	19:09:46 01:03:07	1980	22800	91,3	9,2
28.09.97	Ca	19:13:10 04:06:59	1,7	13	87,7	12,6	Ca ⁺	19:23:37 21:47:10	1,4	9	97,5	9,0
29.09.97	Ca	18:27:54 21:57:43	1,2	12	97,9	12,0	Fe	23:03:07 04:06:59	2500	26500	86,9	3,6
07.10.97	Ca	19:23:53 01:26:51	3,9	59	92,7	4,6	Ca ⁺	18:47:17 21:57:43	2296	24100	87,5	4,8
19.10.97	Ca	21:10:20 04:03:10	6,4	148	90,5	3,0	Ca ⁺	19:41:50 01:26:51	2,6	47	91,9	91,5
22.10.97	Ca	18:23:27 19:27:57	4,1	76	96,1	3,6	Ca ⁺	21:41:10 04:03:10	7,9	142	91,5	94,1
							Ca ⁺	18:40:13 19:27:57	11,3	377	94,1	2,8

Tab. B.1 (Forts.): Übersicht über die Sondierungen des IAP-Doppellidars mit den jeweiligen Nachmitttelwerten.

Datum	Metall 1	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]	Metall 2	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]
27.10.97	Ca	22:06:25 05:16:27	3,3	26	89,9	16,8	Fe	22:11:26 05:16:27	2754	23600	84,3	10,8
31.10.97	Fe	17:29:00 04:54:08	2620	24200	85,3	13,2	Na	19:42:00 04:54:08				
04.11.97	Ca	18:49:54 23:55:22	4,0	56	92,3	6,2	Ca ⁺	19:07:45 23:55:22	6,0	100	92,1	2,6
15.11.97	Ca	20:37:56 22:45:54	3,2	54	89,1	4,2	Na	19:55:46 22:45:54				
19.11.97	Ca	17:33:29 20:08:34	3,3	48	93,5	4,2	Na	17:48:44 20:08:34				
20.11.97	Ca	16:52:06 17:02:14	3,7	46	97,9	13,8						
02.12.97	Ca	17:36:19 22:51:22	3,8	50	89,3	6,4	Na	17:49:53 22:51:22				
17.12.97	Ca	16:19:13 16:37:18	4,4	99	92,5	2,4						
11.01.98	Ca	18:17:11 22:38:21	1,3	12	86,9	9,4	Na	18:31:32 22:38:21				
26.01.98	Ca	18:59:01 20:04:14	1,1	14	91,3	5,0	Ca ⁺	18:40:37 20:04:14	2,5	26	95,1	18,4
02.03.98	Ca	23:16:07 03:29:04	1,0	8	92,5	12,2	Ca ⁺	01:17:25 03:29:04	1,2	25	97,3	3,0
05.03.98	Ca	21:49:53 23:37:10	0,6	6	87,1	11,2	Na	22:15:30 23:37:10				
06.03.98	Ca	22:14:16 00:08:38	1,1	20	93,5	3,0	Na	22:19:42 00:08:38				
07.03.98	Ca	18:56:12 19:58:25	0,8	15	89,7	3,0	Na	19:08:18 19:58:25				
09.03.98	Ca	18:18:54 03:09:24	0,9	9	92,3	8,2	Na	18:41:11 03:09:24				
10.03.98	Ca	20:51:22 04:50:21	2,1	42	91,7	2,8	Na	20:51:22 04:50:21				
17.04.98	Ca	23:14:31 01:16:34	0,7	7	89,7	9,2	Na	23:25:30 01:16:34				
20.04.98	Ca	20:05:32 02:49:40	1,1	10	89,1	10,2	Na	20:18:00 02:49:40				
22.04.98	Ca	20:53:29 00:34:08	0,8	9	92,5	10,2	Na	20:57:13 00:34:08				
24.04.98	Ca	19:55:38 02:29:49	1,5	14	89,7	6,4	Na	20:00:49 02:29:49				
02.05.98	Ca	20:21:17 23:35:07	0,9	13	86,5	5,4	Na	20:26:20 23:35:07				
05.05.98	Ca	21:30:10 02:01:25	1,1	31	87,9	2,4	Na	21:40:51 02:01:25				
06.05.98	Ca	21:24:56 02:08:23	1,6	28	94,3	1,8	Na	21:33:14 02:08:23				
10.05.98	Ca	21:51:06 01:28:37	1,2	16	88,7	5,8	Na	22:08:56 01:28:37				
14.05.98	Ca	20:37:31 02:02:20	1,9	30	87,1	5,4	Na	20:37:31 02:02:20				
19.05.98	Ca	20:46:48 01:15:40	1,0	14	89,5	4,4	Ca ⁺	21:39:11 01:15:40	13,2	310	110,9	2,6
20.05.98	Ca	22:34:39 01:31:19	4,0	89	88,7	3,2	Ca ⁺	22:49:09 01:31:19	11,5	457	107,3	1,2
04.06.98	Ca	21:16:37 23:43:44	2,5	21	114,5	30,4	Ca ⁺	22:26:28 23:43:44	1,6	15	109,1	39,2
18.06.98	Ca	22:27:01 00:34:46	1,1	14	88,3	4,6	Ca ⁺	22:45:32 00:34:46	2,4	38	94,7	4,0
25.06.98	Ca	21:53:15 00:33:02	0,9	17	88,3	2,6						
29.06.98	Ca	22:33:43 23:55:38	1,5	22	86,1	4,0	Ca ⁺	22:48:23 23:55:38	1,5	41	100,3	1,6
09.07.98	Ca	22:17:44 22:52:53	1,4	19	87,3	6,0	Ca ⁺	22:22:57 22:52:53	6,1	324	101,5	1,4
20.07.98	Ca	21:17:04 00:59:52	1,5	19	87,1	3,6	Ca ⁺	21:29:50 00:59:52	21,0	726	101,7	2,6
21.07.98	Ca	21:20:44 00:42:20	0,7	10	88,5	5,0	Ca ⁺	21:30:49 00:42:20	2,0	33	106,7	1,6
11.08.98	Ca	21:28:50 23:28:53	1,0	15	86,9	4,4	Na	21:28:50 23:28:53				

Tab. B.1 (Forts.): Übersicht über die Sondierungen des IAP-Doppellidars mit den jeweiligen Nachtmittelwerten.

Datum	Metall 1	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]	Metall 2	von- bis [UT]	Säulen- dichte [10^7 cm^{-2}]	Maximal- dichte [cm^{-3}]	Höhe des Maximums [km]	FWHM [km]
12.08.98	Ca	22:05:37 02:10:21	1,6	28	87,3	3,2	Na	22:05:37 02:10:21				
27.08.98	Ca	19:45:27 00:14:24	3,9	68	88,3	5,4	Na	19:53:16 00:14:24				
09.09.98	Ca	20:14:52 02:12:20	1,8	11	86,9	15,0	Na	20:29:30 02:12:20				
15.09.98	Ca	20:23:15 01:13:47	8,7	119	90,5	6,8	Ca ⁺	20:44:43 01:13:47	21,4	361	90,1	4,4
06.10.98	Ca	20:48:36 04:18:37	3,7	42	90,1	7,6	Ca ⁺	21:01:42 04:18:37	3,6	35	95,3	14,0
09.11.98	Ca	20:25:22 21:48:33	2,5	28	89,5	8,0	Ca ⁺	20:39:16 21:48:33	6,8	46	93,7	24,0
17.11.98	Ca	21:33:36 00:50:11	3,9	51	95,9	6,8	Fe	21:52:07 00:50:11	2472	22600	91,7	12,0
22.11.98	Ca	19:39:20 03:31:08	2,8	30	94,3	7,0	Fe	19:44:44 03:31:08	3046	23400	84,3	14,2
09.12.98	Ca	17:42:40 06:00:08	3,7	56	89,1	4,8	Ca ⁺	17:54:58 06:00:08	4,4	42	97,5	11,2
14.12.98	Ca	21:29:30 22:40:41	2,9	51	88,9	6,8	Fe	21:39:47 22:40:41	2089	23600	89,1	8,0
08.03.99	Ca	19:33:09 03:24:15	0,5	4	87,7	11,4	Fe	19:41:30 03:24:15	1228	12800	86,9	8,6
13.03.99	Ca	22:08:23 04:04:33	3,3	65	92,7	4,2	Fe	22:16:01 04:04:33	1396	15300	93,1	10,6
24.03.99	Ca	21:40:19 03:37:35	1,8	22	94,1	7,4	Fe	21:49:28 03:37:35	1654	16000	89,3	11,2
30.03.99	Ca	19:23:58 03:57:30	0,9	8	92,1	10,4	Fe	19:31:57 03:57:30	1679	15400	87,9	10,6
30.04.99	Ca	20:20:05 02:05:43	0,9	36	93,7	0,8	Ca ⁺	20:28:25 02:05:43	2,7	28	123,7	11,4
04.05.99	Ca	20:14:14 01:53:09	1,0	13	92,1	6,6	Ca ⁺	20:24:09 01:53:09	1,4	15	92,7	6,2
07.05.99	Ca	20:17:29 01:48:32	0,8	7	87,3	9,0	Ca ⁺	20:34:51 01:48:32	5,2	64	104,1	4,8
18.05.99	Ca	20:49:13 01:13:06	2,3	25	87,7	6,0	Ca ⁺	20:56:59 01:13:06	22,9	479	109,5	5,2
20.05.99	Ca	21:07:25 01:29:04	0,9	12	87,9	4,2	Ca ⁺	21:12:46 23:24:04	4,9	50	119,7	21,2
14.08.99	Ca	22:12:17 02:21:46	1,9	27	86,5	5,6	Ca ⁺	22:12:17 02:21:46	4,9	45	101,1	12,4
16.08.99	Ca	22:18:13 01:16:55	1,2	18	86,1	4,8	Ca ⁺	22:18:13 01:16:55	1,6	19	99,9	3,8
04.09.99	Ca	19:42:52 01:00:40	1,0	11	86,7	3,4	Ca ⁺	19:58:10 01:00:40	4,5	84	100,1	4
05.09.99	Ca	21:28:54 01:24:22	2,0	31	86,1	4,2	Ca ⁺	21:34:25 01:22:09	4,9	101	95,3	5,4

C Literaturverzeichnis

- Alpers, M., Untersuchung der mesosphärischen Eisenschicht in polaren und niedrigen geographischen Breiten mittels Lidar, *Dissertation, Universität Bonn*, 1993
- Alpers, M., J. Höffner und U. von Zahn, Iron atom densities in the polar mesosphere from lidar observations, *Geophys. Res. Lett.*, *17*, 2345-2348, 1990
- Alpers, M., T. Blix, S. Kirkwood, D. Krankowsky, F.-J. Lübken, S. Lutz und U. von Zahn, First simultaneous measurements of neutral and ionized iron densities in the upper mesosphere, *J. Geophys. Res.*, *98*, 275-283, 1993
- Alpers, M., J. Höffner und U. von Zahn, Sporadic Fe and E layers at polar, middle, and low latitudes, *J. Geophys. Res.*, *99*, 14971-14985, 1994
- Alpers, M., J. Höffner und U. von Zahn, Upper atmosphere Ca and Ca⁺ at mid-latitudes: First simultaneous and common-volume lidar observations, *Geophys. Res. Lett.*, *23*, 567-570, 1996
- Alpers, M., R. Eixmann, J. Höffner, T. Köpnick, J. Schneider und U. von Zahn, The Rayleigh-Mie-Raman lidar at IAP Kühlungsborn, *J. Aerosol Sci.*, *30*, Suppl. 1, 637-638, 1999a
- Alpers, M., M. Gerding, J. Höffner und U. von Zahn, Particle properties from 5-wavelengths lidar observation of a noctilucent cloud at the mid-latitude location Kühlungsborn, Germany (54°N), *J. Geophys. Res.*, submitted, 1999b
- Arndt, P., J. Bohsung, M. Metz und E. K. Jessberger, The elemental abundances in interplanetary dust particles, *Meteoritics Planet. Sci.*, *31*, 817-833, 1996
- Barbieri, B., N. Beverini und A. Sasso, Optogalvanic spectroscopy, *Rev. Mod. Phys.*, *62*, 603-640, 1990
- Bates, D. R. und A. Dalgarno, Atomic and molecular processes, D. R. Bates (Hrsg.), *Academic Press, San Diego, Calif.*, 245-271, 1962
- Batista, P. P., B. R. Clemesha, I. S. Batista und D. M. Simonich, Characteristics of the sporadic sodium layers observed at 23°S, *J. Geophys. Res.*, *94*, 15349-15358, 1989
- Beatty, T. J., R. E. Bills, K. H. Kwon und C. S. Gardner, CEDAR lidar observations of sporadic Na layers at Urbana, Illinois, *Geophys. Res. Lett.*, *15*, 1137-1140, 1988
- Beatty, T. J., R. L. Collins, C. S. Gardner, C. A. Hostetler, C. F. Sechrist jr. und C. A. Tepley, Simultaneous radar and lidar observations of sporadic E and Na layers at Arecibo, *Geophys. Res. Lett.*, *16*, 1019-1022, 1989
- Bills, R. E. und C. S. Gardner, Lidar observations of mesospheric Fe and sporadic Fe layers at Urbana, Illinois, *Geophys. Res. Lett.*, *17*, 143-146, 1990
- Bilitza, D., K. Rawer, L. Bossy und T. Gulyaeva, International Reference Ionosphere - past, present, future, *Adv. Space Res.*, *13*, 3-23, 1993
- Bone, N., *Observers Guide: Meteors, Sky and Telescope*, Sky Publishing Corp., Cambridge, MA, 1993
- Borovicka, J., A fireball spectrum analysis, *Astron. Astrophys.*, *279*, 627-645, 1993
- Borovicka, J., Line identifications in a fireball spectrum, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, *103*, 83-96, 1994a

- Borovicka, J., Two components in meteor spectra, *Planet. Space Sci.*, 42, 145-150, 1994b
- Bowman, M. R., A. J. Gibson und M. C. W. Sandford, Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar, *Nature*, 221, 456-457, 1969
- Brasseur, G. und S. Solomon, Aeronomy of the middle atmosphere: chemistry and physics of the mesosphere, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1986
- Broadfoot, A. L., Twilight Ca⁺ emission from meteor trails up to 280 km, *Planet. Space Sci.*, 15, 503-514, 1967
- Brownlee, D. E., Cosmic dust: collection and research, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 13, 147-173, 1985
- Brownlee, D. E., B. Bates und L. Schramm, The elemental composition of stony cosmic spherules, *Meteoritics Planet. Sci.*, 32, 157-175, 1997
- Ceplecha, Z., J. Borovicka, W. G. Elford, D. O. Revelle, R. L. Hawkes, V. Porubcan und M. Simek, Meteor phenomena and bodies, *Space Sci. Rev.*, 84, 327-471, 1998
- Chimonas, G. und W. I. Axford, Vertical movement of temperate-zone sporadic E layers, *J. Geophys. Res.*, 73, 111-117, 1968
- CIRA 1986, COSPAR International Reference Atmosphere, Part 2: Middle Atmosphere Models, *Adv. Space Res.*, 10, 1990
- Clemesha, B. R., Sporadic neutral metal layers in the mesosphere and lower thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 725-736, 1995
- Clemesha, B. R., V. W. J. H. Kirchhoff, D. M. Simonich und H. Takahashi, Evidence of an extraterrestrial source for the mesospheric sodium layer, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 873-876, 1978
- Clemesha, B. R., P. P. Batista und D. M. Simonich, Concerning the origin of enhanced sodium layers, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1267-1270, 1988
- von Cossart, G., J. Fiedler, U. von Zahn, H. Hansen und U.-P. Hoppe, Noctilucent clouds: One- and two-color lidar observations, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1635-1638, 1997
- von Cossart, G., J. Fiedler und U. von Zahn, Size distributions of NLC particles as determined from 3-color observations of NLC by groundbased lidar, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1513-1516, 1999
- Cox, R. M. und J. M. C. Plane, An ion-molecule mechanism for the formation of neutral sporadic Na-layers, *J. Geophys. Res.*, 103, 6349-6359, 1998
- DeMore, W. B., S. P. Sander, D. M. Golden, R. F. Hampson, M. J. Kurylo, C. J. Howard, A. R. Ravishankara, C. E. Kolb und M. J. Molina, Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling: Evaluation number 11, *JPL Publ. 94-26*, 1994
- Dohnanyi, J. S., Particle dynamics, in: Cosmic Dust, J.A.M. McDonnell (Hrsg.), *Wiley, New York*, 527-605, 1978
- D'Yakonov, M. I., Theory of resonance scattering of light by a gas in the presence of a magnetic field, *Soviet Physics JETP*, 20.6, 1484-1489, 1965
- Ebel, A., Eddy diffusion models for the mesosphere and lower thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 42, 617-628, 1980
- Eska, V., Die Kaliumschicht in der oberen Atmosphäre (75-110 km): Beobachtungen, Analysen und Modellierung, *Dissertation, Universität Rostock*, 1998
- Eska, V. und J. Höffner, Observed linear and nonlinear K layer response, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2933-2936, 1998

- Eska, V., J. Höffner und U. von Zahn, The upper atmosphere potassium layer and its seasonal variability at 54 °N, *J. Geophys. Res.*, *103*, 29207-29214, 1998
- Eska, V., U. von Zahn und J. M. C. Plane, The terrestrial potassium layer (75-110 km) between 71°S and 54°N: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, *104*, 17173-17186, 1999
- Ferguson, E. E. und F. C. Fehsenfeld, Some aspects of the metal ion chemistry of the earth's atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *73*, 6215-6223, 1968
- Fleming, E. L., S. Chandra, J. J. Barnett und M. Corney, Zonal mean temperature, pressure, zonal wind, and geopotential height as functions of latitude, *Adv. Space Res.*, *10*, 11-59, 1990
- Flynn, G. J., Atmospheric entry heating: a criterion to distinguish between asteroidal and cometary sources of interplanetary dust, *Icarus*, *77*, 287-310, 1989
- Fricke, K. H. und U. von Zahn, Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D2 resonance line of sodium by lidar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *47*, 499-512, 1985
- Gadsden, M., Antarctic twilight observations: 1. Search for metallic emission lines, *Ann. Geophys.*, *25*, 667-677, 1969a
- Gadsden, M., Antarctic twilight observations: 2. Sodium emission at 90°S, *Ann. Geophys.*, *25*, 721-730, 1969b
- Gadsden, M., Metallic atoms and ions in the upper atmosphere, *Ann. Geophys.*, *26*, 141-150, 1970
- Garcia, R. R. und S. Solomon, A numerical model of the zonally averaged dynamical and chemical structure of the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *88*, 1379-1400, 1983
- Garcia, R. R. und S. Solomon, The effect of breaking gravity waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, *90*, 3850-3868, 1985
- Garcia, R. R. und S. Solomon, A new numerical model of the middle atmosphere, 2. Ozone and related species, *J. Geophys. Res.*, *99*, 12937-12951, 1994
- Gardner, C. S. und J. D. Shelton, Density response of neutral atmospheric layers to gravity wave perturbations, *J. Geophys. Res.*, *90*, 1745-1754, 1985
- Gardner, C. S., D. G. Voelz, C. F. Sechrist jr. und A. C. Segal, Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois, 1. Seasonal and nocturnal variations, *J. Geophys. Res.*, *91*, 13659-13673, 1986
- Gardner, C. S., D. C. Senft und K. H. Kwon, Lidar observations of substantial sodium depletion in the summertime arctic mesosphere, *Nature*, *332*, 142-144, 1988
- Gardner, C. S., T. J. Kane, D. C. Senft, J. Qian und G. C. Papen, Simultaneous observations of sporadic E, Na, Fe, and Ca⁺ layers at Urbana, Illinois: Three case studies, *J. Geophys. Res.*, *98*, 16865-16873, 1993
- Gardner, J. A., R. A. Viereck, E. Murad, D. J. Knecht, C. P. Pike, A. L. Broadfoot und E. R. Anderson, Simultaneous observations of neutral and ionic magnesium in the thermosphere, *Geophys. Res. Lett.*, *22*, 2119-2122, 1995
- von der Gathen, P., Das Na-Temperatur-Lidar: Berechnung von Sättigungseffekten, Beobachtung von Temperaturprofilen und Ableitung spektraler Leistungsdichten, *Dissertation, Universität Bonn*, 1990

- Gerding, M., M. Alpers, U. von Zahn, W. J. McNeil und E. Murad, Abundances of Ca and Fe in meteor trails from groundbased lidar, *Eos Trans. AGU*, 79, Fall Meet. Suppl., F685, 1998
- Gerding, M., M. Alpers und U. von Zahn, Abundances of Ca and Fe in meteor trails from groundbased lidar, *Geophys. Res. Abstr.*, 1, 3, 726, 1999a
- Gerding, M., M. Alpers, J. Höffner und U. von Zahn, Simultaneous K and Ca lidar observation during a meteor shower on March 6/7, 1997 at Kühlungsborn, Germany, *J. Geophys. Res.*, 104, 24689-24698, 1999b
- Gibson, A. J. und M. C. W. Sandford, The seasonal variation of the night-time sodium layer, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33, 1675-1684, 1971
- Goldsmith, J. E. M. und J. E. Lawler, Optogalvanic spectroscopy, *Contemp. Phys.*, 22, 235-248, 1981
- Granier, C., J. P. Jegou und G. Megie, Resonant lidar detection of Ca and Ca⁺ in the upper atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 655-658, 1985a
- Granier, C., J. P. Jegou, M. L. Chanin und G. Megie, General theory of the alkali metals present in the earth's upper atmosphere, III. Diurnal variations, *Ann. Geophys.*, 3, 445-450, 1985b
- Granier, C., J. P. Jegou und G. Megie, Atomic and ionic calcium in the Earth's upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 94, 9917-9924, 1989
- Grebowsky, J. M., R. A. Goldberg und W. D. Pesnell, Do meteor showers significantly perturb the ionosphere, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60, 607-615, 1998
- Greshake, A., W. Klöck, P. Arndt, M. Maetz, G. J. Flynn, S. Bajt und A. Bischoff, Heating experiments simulating atmospheric entry heating of micrometeorites: Clues to their parent body sources, *Meteoritics Planet. Sci.*, 33, 267-290, 1998
- Gumbel, J., Rocket-borne optical measurements of minor constituents in the middle atmosphere, *Doctoral Dissertation, Stockholm University*, 1997
- Hake, R. D., jr., D. E. Arnold, D. W. Jackson, W. E. Evans, B. P. Ficklin und R. A. Long, Dye-laser observations of the nighttime atomic sodium layer, *J. Geophys. Res.*, 77, 34, 6839-6848, 1972
- Halliday, I., A study of spectral line identifications in Perseid meteor spectra, *Publ. Dominion Obs. Ottawa*, 25, 1961
- Hanle, W., Über magnetische Beeinflussung der Polarisierung der Resonanzfluoreszenz, *Z. Phys.*, 30, 93-105, 1924
- Hansen, G. und U. von Zahn, Sudden sodium layers in polar latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, 585-608, 1990
- Harvey, G. A., Elemental abundance determination for meteors by spectroscopy, *J. Geophys. Res.*, 78, 3913-3926, 1973
- Hedin, A. E., Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 1159-1172, 1991
- Helmer, M. und J. M. C. Plane, A study of the reaction NaO₂+O → NaO+O₂: Implications for the chemistry of sodium in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 98, 23207-23222, 1993
- Helmer, M., J. M. C. Plane und M. R. Allen, A kinetic investigation of the reaction Ca + O₃ over the temperature range 213-383 K, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 89, 763-769, 1993

- Helmer, M., J. M. C. Plane, J. Qian und C. S. Gardner, A model of meteoric iron in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 10913-10925, 1998
- Herrmann, U., P. Eberhardt, M. A. Hidalgo, E. Kopp und L. G. Smith, Metal ions and isotopes in sporadic E-layers during the Perseid meteor shower, *Adv. Space Res.*, 18, 249-252, 1978
- Hickey, M. P. und J. M. C. Plane, A chemical-dynamical model of wave-driven sodium fluctuations, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2861-2864, 1995
- Höffner, J., Metallschichten in der Mesosphäre: Beobachtungen und Modellierung, *Dissertation, Universität Bonn*, 1994
- Höffner, J. und U. von Zahn, 1- and 3-dimensional numerical simulations of the formation of sporadic ion-layers below 100 km altitude, *Proc. 11th ESA Symp. Eur. Rocket & Balloon Programmes & Related Research, Montreux, Switzerland, ESA SP-355*, 1994
- Höffner, J., U. von Zahn, W. J. McNeil und E. Murad, The 1996 leonid shower as studied with an potassium lidar: Observations and inferred meteor sizes, *J. Geophys. Res.*, 104, 2633-2643, 1999
- Hughes, D. W., Cosmic dust influx to the upper atmosphere during major meteor showers, in: Space Research XIV, M. J. Mycroft and R. D. Reasenberg (Hrsg.), *Akademie-Verlag, Berlin*, 709-713, 1974
- Hughes, D. W., Cosmic dust influx to the earth, in: Space Research XV, M. J. Mycroft (Hrsg.), *Akademie-Verlag, Berlin*, 531-539, 1975
- Hughes, D. W., Meteors, in: Cosmic Dust, J. A. M. McDonnell (Hrsg.), *Wiley, New York*, 123-185, 1978
- Hunten, D. M., A meteor-ablation model of the sodium and potassium layers, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 369-372, 1981
- Hunten, D. M., R. P. Turco und O. B. Toon, Smoke and Dust Particles of Meteoric Origin in the Mesosphere and Stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 37, 1342-1357, 1980
- Istomin, V. G., Ions of extra-terrestrial origin in the Earth ionosphere, in: Space Research III, *North-Holland, Amsterdam*, 209-220, 1963
- Jenniskens, P., Meteor stream activity: I. The annual streams, *Astron. Astrophys.*, 287, 990-1013, 1994
- Jenniskens, P., Physical conditions of temperature and pressure in the meteor path, *Geophys. Res. Abstr.*, 1, 726, 1999
- Jensen, D. E. und G. A. Jones, Reaction rate coefficients for flamae calculations, *Combustion and Flame*, 32, 1-34, 1978
- Jewitt, D. C. und J. X. Luu, The solar system beyond Neptune, *Astronomical Journal*, 109, 1867-1876, 1995
- Joiner, J. und A. C. Aikin, Temporal and spatial variations in upper atmospheric Mg⁺, *J. Geophys. Res.*, 101, 5239-5249, 1996
- Junge, C. E., O. Oldenburg und J. T. Watson, On the origin of the sodium present in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 67, 1027-1039, 1962
- Kane, T. J., C. A. Hostetler und C. S. Gardner, Horizontal and vertical structure of the major sporadic sodium layer events observed during ALOHA-90, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1365-1368, 1991
- Kane, T. J. und C. S. Gardner, Lidar observations of the meteoric deposition of mesospheric metals, *Science*, 259, 1297-1300, 1993a

- Kane, T. J. und C. S. Gardner, Structure and seasonal variability of the nighttime mesospheric Fe layer at midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, 98, D9, 16875-16886, 1993b
- Kerridge, J. F. und M. S. Matthews (Hrsg.), Meteorites and the early solar system, *University of Arizona Press, Tucson*, 1988
- Kirkwood, S. und P. N. Collis, Gravity wave generation of simultaneous auroral sporadic-E layers and sudden neutral sodium layers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 259-269, 1989
- Kirkwood, S. und U. von Zahn, On the role of auroral electric fields in the formation of low altitude sporadic-E and sudden sodium layers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 389-407, 1991
- Kirkwood, S. und U. von Zahn, Formation mechanisms for low-altitude E(s) and their relationship with neutral Fe layers: Results from the METAL campaign, *J. Geophys. Res.*, 98, 21549-21561, 1993
- Kopp, E., On the abundance of metal ions in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 9667-9674, 1997
- Kopp, E., P. Eberhardt, U. Herrmann und L. G. Björn, Positive ion composition of the high-latitude summer D-region with noctilucent clouds, *J. Geophys. Res.*, 90, 13041-13053, 1985
- Kwon, K. H., D. C. Senft und C. S. Gardner, Lidar observations of sporadic sodium layers at Mauna Kea Observatory, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 93, 14199-14208, 1988
- Littmann, M., The heavens on fire: The great Leonid meteor storms, *Cambridge University Press*, 1998
- Love, S. G. und D. E. Brownlee, Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the Earth's atmosphere, *Icarus*, 89, 26-43, 1991
- Love, S. G. und D. E. Brownlee, A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust, *Science*, 262, 550-553, 1993
- McNeil, W. J., E. Murad und S. T. Lai, Comprehensive model for the atmospheric sodium layer, *J. Geophys. Res.*, 100, 16847-16855, 1995
- McNeil, W. J., S. T. Lai und E. Murad, Models of thermospheric sodium, calcium, and magnesium at the magnetic equator, *Adv. Space Res.*, 21, 863-866, 1998a
- McNeil, W. J., S. T. Lai und E. Murad, Differential ablation of cosmic dust and implications for the relative abundance of atmospheric metals, *J. Geophys. Res.*, 103, 10899-10911, 1998b
- Megie, G. und J. E. Blamont, Laser sounding of atmospheric sodium; Interpretation in terms of global atmospheric parameters, *Planet. Space Sci.*, 25, 1093-1109, 1977
- Molau, S., M. Nitschke, M. de Liginie, R. L. Hawkes und J. Rendtel, Video observations of meteors: history, current status and future, *WGN, Int. Meteor Org.*, 25, 1997
- Nagasawa, C. und M. Abo, Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 263-266, 1995
- Nesmeyanov, A. N., Vapor pressure of the chemical elements, R. Gray (Hrsg.), *Elsevier Publ. Comp., Amsterdam*, 1963
- Nien, C. F., B. Rajasekhar und J. M. C. Plane, The unusual kinetic behavior of the reactions $Mg+O_2+M$ and $Ca+O_2+M$ ($M=N_2, He$) over extended temperature ranges, *J. Phys. Chem.*, 97, 6449-6456, 1993
- Notsu, K., N. Onuma, N. Nishida und H. Nagasawa, High temperature heating of the Allende meteorite, *Geochim. Cosmochim. Act.*, 42, 903-915, 1978

- Plane, J. M. C., The chemistry of meteoric metals in the Earth's upper atmosphere, *Int. Rev. Phys. Chem.*, 10, 55-105, 1991
- Plane, J. M. C., A comparison between the oxidation reactions of the alkali and alkaline earth atoms, in: A. Fontijn (Hrsg.), Gas-Phase Metal Reactions, Elsevier, 29-56, 1992
- Plane, J. M. C. und C. F. Nien, A kinetic investigation of the Ca/CaO-System: Non-Arrhenius behavior of the reaction $\text{Ca}(^1\text{S})+\text{N}_2\text{O}$ over the temperature range 250-898 K and a study of the reaction $\text{CaO}+\text{O}$, *J. Phys. Chem.*, 94, 5255-5261, 1990
- Plane, J. M. C. und M. Helmer, Laboratory studies of the chemistry of meteoric metals, in: R. G. Compton and G. Hancock (Hrsg.), Research in chemical kinetics, Volume 2, 313-367, 1994
- Plane, J. M. C. und M. Helmer, Laboratory study of the reactions $\text{Mg}+\text{O}_3$ and $\text{MgO}+\text{O}_3$, *Farad. Disc.*, 100, 411-430, 1995
- Plane, J. M. C., R. M. Cox, J. Qian, W. M. Pfenninger, G. C. Papen, C. S. Gardner und P. J. Espy, Mesospheric Na layer at extreme high latitudes in summer, *J. Geophys. Res.*, 103, 6381-6389, 1998
- Plane, J. M. C., C. S. Gardner, J. Yu, C. Y. She, R. R. Garcia und H. C. Pumphrey, Mesospheric Na layer at 40°N: Modeling and Observations, *J. Geophys. Res.*, 104, 3773-3788, 1999
- Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky und W. T. Vetterling, Numerical recipes in Pascal, *Cambridge University Press*, 1992
- Pumphrey, H. C. und R. S. Harwood, Water vapor and ozone in the mesosphere as measured by UARS MLS, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1399-1402, 1997
- Qian, J. und C. S. Gardner, Simultaneous lidar measurements of mesospheric Ca, Na, and temperature profiles at Urbana, Illinois, *J. Geophys. Res.*, 100, 7453-7461, 1995
- Qian, J., Y. Gu und C. S. Gardner, Characteristics of the sporadic Na layers observed during the Airborne Lidar and Observations of Hawaiian Airglow / Airborne Noctilucent Cloud (ALOHA/ANLC-93) campaigns, *J. Geophys. Res.*, 103, 6333-6347, 1998
- Rendtel, J., R. Arlt und A. McBeath (Hrsg.), Handbook for visual meteor observers, *Intern. Meteor Organisation (IMO) Monograph No. 2*, IMO, Potsdam, 1995
- Richter, E. S. und C. F. Sechrist, A meteor ablation-cluster ion atmospheric sodium theory, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 183-186, 1979
- Röhe-Hansen, J. und V. Helbig, Pressure broadening of the calcium 657.3 nm line by helium, neon and argon, *J. Phys. B*, 25, 71-82, 1992
- Rollason, R. J. und J. M. C. Plane, A kinetic study of the reactions between Fe^+ ions and O_3 , O_2 and N_2 , *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 94, 3067-3075, 1998
- Rowe, B. R., D. W. Fahey, E. E. Ferguson und F. C. Fehsenfeld, Flowing afterglow studies of gas phase magnesium ion chemistry, *J. Chem. Phys.*, 75, 3325-3328, 1981
- Rutherford, J. A., R. F. Mathis, B. R. Turner und D. A. Vroom, Formation of calcium ions by charge transfer, *J. Chem. Phys.*, 57, 3087-3090, 1972
- Schminder, R., D. Kürschner, W. Singer, P. Hoffmann, D. Keuer und J. Bremer, Representative height-time cross-sections of the upper atmosphere wind field over Central Europe 1990-1996, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59, 2177-2184, 1997
- Schofield, K., The flame chemistry of alkali and alkaline earth metals, in: A. Fontijn (Hrsg.), Gas-Phase Metal Reactions, Elsevier, 529-563, 1992

- Senft, D. C., R. L. Collins und C. S. Gardner, Mid-latitude lidar observations of large sporadic sodium layers, *Geophys. Res. Lett.*, *16*, 715-718, 1989
- She, C. Y., J. R. Yu, J. W. Huang, C. Nagasawa und C. S. Gardner, Na temperature lidar measurements of gravity wave perturbations of wind, density and temperature in the mesopause region, *Geophys. Res. Lett.*, *18*, 1329-1331, 1991
- She, C. Y. und U. von Zahn, Concept of a two-level mesopause: Support through new lidar observations, *J. Geophys. Res.*, *103*, 5855-5863, 1998
- Shimazaki, T., Minor constituents in the middle atmosphere, *Terra Scientific Publishing Company, Reidel Publishing Company*, 1985
- Simonsen, H. R., Frequency noise reduction of visible InGaAlP laser diodes by different optical feedback methods. Applications to spectral measurements of Calcium., *Ph.D. thesis, University of Aarhus and Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, 1992
- Slipher, V. M., Emission in the spectrum of light in the night sky, *Publ. Ast. Soc. Pacif.*, *Vol. 41*, 262-263, 1929
- Sprenger, K., Diurnal and seasonal variations of occurrence of sporadic E-layers over central Europe, *Beitr. Geophys.*, *90*, 305-315, 1981
- States, R. J. und C. S. Gardner, Structure of the mesospheric Na layer at 40°N latitude: Seasonal and diurnal variations, *J. Geophys. Res.*, *104*, 11783-11798, 1999
- Swider, W., Ionic reactions for meteoric elements, *Ann. Geophys.*, *26*, 595-599, 1970
- Tilgner, C. und U. von Zahn, Average properties of the sodium density distribution as observed at 69°N latitude in winter, *J. Geophys. Res.*, *93*, 8439-8454, 1988
- Vallance-Jones, A., Ca II emission lines in the twilight spectrum, *Nature*, *178*, 1956
- Voiculescu, M., C. Haldoupis und K. Schlegel, Evidence for planetary wave effects on midlatitude backscatter and sporadic E layer occurrence, *Geophys. Res. Lett.*, *26*, 1105-1108, 1999
- Wells, H. W., Sporadic E region ionization at Watheroo magnetic observatory, 1938-1944, *Proc. IRE*, *34*, 1946
- Whitehead, J. D., Production and prediction of sporadic E, *Rev. Geophys. Space Phys.*, *8*, 65-145, 1970
- Whitehead, J. D., Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *51*, 401-424, 1989
- von Zahn, U., P. von der Gathen und G. Hansen, Forced release of sodium from upper atmospheric dust particles, *Geophys. Res. Lett.*, *14*, 76-79, 1987
- von Zahn, U. und T. L. Hansen, Sudden neutral sodium layers: A strong link to sporadic E layers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *50*, 93-104, 1988
- von Zahn, U., G. Hansen und H. Kurzawa, Observations of the sodium layer at high latitudes in summer, *Nature*, *331*, 594-596, 1988
- von Zahn, U. und E. Murad, NaHCO₃: A source of Na atoms for sudden sodium layers, *Geophys. Res. Lett.*, *17*, 147-149, 1990
- von Zahn, U. und J. Höffner, Mesopause temperature profiling by potassium lidar, *Geophys. Res. Lett.*, *23*, 141-144, 1996
- von Zahn, U., G. von Cossart, J. Fiedler und D. Rees, Tidal variations of noctilucent clouds measured at 69°N latitude by groundbased lidar, *Geophys. Res. Lett.*, *25*, 1289-1292, 1997

- von Zahn, U., M. Gerding, J. Höffner, W. J. McNeil und E. Murad, Iron, calcium, and potassium atom densities in the trails of Leonids and other meteors: Strong evidence for differential ablation, *Meteoritics Planet. Sci.*, 34, 1017-1027, 1999
- Zbinden, P. A., M. A. Hidalgo, P. Eberhardt und J. Geiss, Mass spectrometer measurements of the positive ion composition in the D- and E-regions of the ionosphere, *Planet. Space Sci.*, 23, 1621-1642, 1975
- Zimmermann, D., Determination of the lifetime of the 4P_{1/2}-state of potassium by Hanle-effect, *Z. Phys.*, A275, 1975

Danksagung

Viele verschiedene Personen am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik haben mich in den letzten drei Jahren unterstützt:

Herrn Prof. Dr. U. von Zahn danke ich herzlich für die Aufnahme an das IAP und die Betreuung dieser Arbeit. Seine Ideen, seine Kontakte und seine Erfahrung gaben dieser Arbeit viele wertvolle Impulse. Herrn Dr. M. Alpers danke ich für die Projektstellung, die Hilfe bei der Wartung des „Veteranen“ und die hervorragende und angenehme Zusammenarbeit bei Messungen und Auswertung. Ich habe ein sehr erfolgreiches Experiment von ihm übernommen. Herr Dr. J. Höffner versuchte, mich mit sehr großer Geduld in die tieferen Geheimnisse objektorientierter Programmierung einzuführen. Ich glaube, zumindest einen Teil davon verstanden zu haben. Dafür gilt ihm mein herzlicher Dank.

Herrn Prof. G. von Cossart verdanke ich viele wertvolle Tips und Hinweise beim Zusammenschreiben dieser Arbeit. Sein kritischer Blick ermöglichte an verschiedenen Stellen eine Verbesserung des Manuskripts. Viele elektronische Bauteile sind direkt am IAP entwickelt und hergestellt worden, u.a. die Zähler für Profile von Meteorspuren mit 7,5 m Höhenauflösung. Herrn T. Köpnick danke ich für die hervorragende Arbeit bei der Konstruktion der Elektronik. Der Bibliothekarin des IAP, Frau Mehl, danke ich dafür, daß sie den langwierigen und mühevollen Weg der Fernleihe oft vergessen lies und Literaturwünsche falls möglich kurzfristig und informell erfüllte.

Herrn Dr. U. Berger und Herrn U. Körner verdanke ich Hinweise zur Mesosphären-Chemie und zur besonderen Problematik der Eddy-Diffusion. Von Herrn Dr. P. Hoffmann erhielt ich Informationen zu Beobachtungen mesosphärischer Gezeiten mit Atmosphärenradars und Herr Dr. J. Bremer gab mir Zugang zu langjährigen Sondierungen von sporadischen E-Schichten mit der Ionosonde in Juliusruh/Rügen. Auch diesen beiden gilt mein besonderer Dank. Die objektorientierte Programmierung erfaßte nicht nur mich, sondern insgesamt 8 Mitarbeiter der Abteilung „Optische Sondierungen“. Allen danke für die erfolgreiche Arbeit an einer allgemeinen Programm-Bibliothek und für die Gewißheit, nicht der einzige zu sein, der unserem „Chef-Programmierer“ J. H. nicht das Wasser reichen konnte.

The Calcium chemistry model is based on the work of Dr. J. M. C. Plane from the University of East Anglia (Norwich, GB), who makes his new laboratory measurements available for this thesis. I gratefully acknowledge the pleasant co-operation. I also acknowledge the work of Dr. E. Murad (Hanscom AFB, Massachusetts, USA) and Dr. W. J. McNeil from Radex, Inc. (Bedford, Massachusetts, USA), who makes their modelling results concerning the ablation of meteoroids entering the Earth's atmosphere available for this thesis.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und meiner Schwester Anke, die mich stetig mit regem Interesse unterstützt und begleitet haben.