

Kapitel 7

Mesoskalige Prozesse in der Stratosphäre

Die mikrophysikalische Entstehung verschiedener PSC-Partikel ist heute weitgehend erforscht (vgl. Kap.3). Auf dieser Basis lassen sich PSC-Beobachtungen in der Arktis mit Hilfe von makroskaligen Temperaturanalysen zum großen Teil erklären. In vielen Fällen kann jedoch die großräumige Meteorologie das Auftreten oder auch das Ausbleiben von PSCs nicht erklären. Solche PSC-Ereignisse, deren Entstehung durch kleinräumige Dynamik im Bereich der Mesoskala (10^1 bis 10^2 km) bedingt ist, liegen dem folgenden Kapitel zugrunde.

Zunächst werden die Indizien für das Auftreten mesoskaliger Prozesse anhand eines Vergleichs von PSC-Ereignissen aus Ny-Ålesund und Sodankylä erläutert. Daran anschließend werden verschiedene mesoskalige Prozesse vorgestellt, die für die Entstehung von solchen nicht-synoptischen PSC-Ereignissen verantwortlich sein können. In Frage kommen dafür die an Gebirgen induzierten stratosphärischen Leewellen, Filamentstrukturen am Rand des polaren Wirbels und das differentielle Absinken von Spurengasen innerhalb des Polarwirbels. In diesem Kapitel werden die Prinzipien der verschiedenen Theorien dargelegt, bevor sie in den folgenden Kapiteln 8 bis 10 zur Interpretation ausgewählter PSC-Ereignisse herangezogen werden.

7.1 Unterschiede der PSC-Beobachtungen in Ny-Ålesund und Sodankylä

Wie schon aus den meteorologischen Erwägungen in Kapitel 5 hervorging, befindet sich die Station Ny-Ålesund üblicherweise während des gesamten Winters im Zentrum des Polarwirbels. Die Messungen in Sodankylä werden dagegen stark von der Position des Wirbels beeinflusst. Die Station liegt innerhalb des Polarwirbels, wenn dieser durch eine Verstärkung des Aläuten-Hochs sehr weit in Richtung Europa verschoben ist (s.Kap.2.3).

Häufig ist der Polarwirbel aber auch in Richtung Kanada und Sibirien elongiert, was zur Folge hat, dass sich Sodankylä ausserhalb des Polarwirbels befindet. Aus den meteorologischen Betrachtungen in Kapitel 5 lässt sich entnehmen, dass Sodankylä typischerweise gerade in der Randzone des polaren Wirbels liegt. Der bedeutende Unterschied zwischen den Stationen Ny-Ålesund und Sodankylä ist daher der, dass sich die PSC-Beobachtungen in PSC-Ereignisse im Wirbelzentrum und PSC-Ereignisse am Wirbelrand unterteilen.

Zum direkten Vergleich der PSC-Messungen beider Stationen eignen sich aufgrund der gleichzeitigen Meßzeiten nur die Winter 1996/1997, 1997/1998 und 1998/1999. Da die PSC-Beobachtungen mit den verwendeten bodengebundenen Lidar-Systemen auf unbewölkte Tage begrenzt sind, ist eine Aussage über die allgemeine Häufigkeit von PSC-Ereignissen nicht möglich. Vergleichbar sind dennoch diejenigen Daten, bei denen an beiden Stationen Lidar-Messungen durchgeführt wurden. Dabei werden folgende Unterschiede beobachtet:

- Es treten Fälle auf, in denen an beiden Stationen die synoptische Temperatur ausreichend niedrig ist, um die Existenz von PSCs zu ermöglichen. Auch die synoptischen Temperaturgeschichten sind vergleichbar. Dennoch werden nur über Sodankylä PSCs gemessen, während in Ny-Ålesund keine PSCs detektiert werden.

z.B. am 12.01.1997, 17.01.1997, 23.01.1997

Bedeutend sind auch Unterschiede bezüglich der Beobachtung des PSC Typs II. Da es sich um keinen direkten Vergleich der beiden Stationen handelt, wurden für diese Betrachtung alle vorhandenen Daten beider Stationen einbezogen:

- In Sodankylä werden PSC Typ II –Ereignisse beobachtet, ohne dass die synoptischen Temperaturen ausreichend niedrig sind, um die Existenz der Wassereis-PSCs zu erklären.

z.B. am 21./22.01.1997, 23.01.1997, 16.12.1997, 02.12.1999

- In Ny-Ålesund werden zwar von den täglichen Radiosonden Temperaturen unter dem Eisgefrierpunkt gemessen, allerdings wurde bei gleichzeitiger Lidarmessung nie eine Wassereis-PSC detektiert.

29.01.1993, 12.01.1995, 18.01.1995, 06.02.1996, 17.+18.01.1996,
21.02.1997, 28.12.1999, 18.01.2000

Aus diesem Vergleich der Stationen folgt, dass die Bedingungen zur PSC-Partikelbildung in Sodankylä (am Rand des Polarwirbels) eher erfüllt sind als in Ny-Ålesund (im Zentrum

des Wirbels). Ein weiteres Indiz dafür ist der Ozonabbau. Wie mit Hilfe der Match-Methode gezeigt wurde, ist der Ozonabbau pro Sonnenstunde in einigen nordhemisphärischen Wintern am Rand des Polarwirbels größer als im Innern des Wirbels (Schulz, 2000).

Weitere Besonderheiten der PSC-Ereignisse sind Fälle, in denen die NAT-Existenztemperatur in einem Höhenbereich von einigen Kilometern unterschritten ist, PSCs aber nur in einem scharf begrenzten Höhenbereich einiger hundert Meter auftritt und eine zeitliche Änderung ihrer Strukturen bezüglich Rückstreu-Intensität und Höhe aufweist.

Die Differenzen zwischen der PSC-Theorie und der PSC-Beobachtung lassen sich klären, wenn man mesoskalige Prozesse in Betracht zieht, welche die Bedingungen zur Partikelbildung verändern, aber nicht in den synoptischen Analysen aufgelöst werden. Im folgenden werden drei mesoskalige Prozesse in der Stratosphäre vorgestellt, die die beschriebenen Unstimmigkeiten in den PSC-Beobachtungen erklären können. Es handelt sich um

- an Gebirgsketten induzierte stratosphärische Leewellen
- Filamente am Polarwirbelrand
- differentielles Absinken von Wasserdampf im Polarwirbel.

Diese dynamischen Prozesse werden in den folgenden Kapiteln mit den beobachteten PSC-Ereignissen korreliert. Zunächst wird ein Überblick über den prinzipiellen Zusammenhang zwischen den verschiedenen mesoskaligen Prozessen und der PSC-Bildung gegeben.

7.2 Zusammenhang von PSCs und stratosphärischen Leewellen

Stratosphärische Leewellen bezeichnen Schwerewellen, die beim Überströmen von Gebirgszügen angeregt werden. Wenn die Atmosphäre thermisch stabil geschichtet ist, können die topographisch angeregten Schwerewellen in die Stratosphäre propagieren. Dabei werden die Luftpakete, die sich auf den vertikal verschobenen isentropen Flächen bewegen, adiabatisch abgekühlt. Dadurch werden in Extremfällen mesoskalige Temperaturanomalien bis zu $\Delta T = 15 \text{ K}$ hervorgerufen (Carshaw et al., 1998 a), die dazu führen, dass die Temperatur lokal die Entstehungstemperatur von PSC-Partikeln unterschreitet. Es können sich so PSCs mit geringer räumlicher Ausdehnung bilden.

Der Prozeß, der hinter den Leewellen-induzierten PSCs steht, ist folglich eine sowohl horizontal als auch vertikal begrenzte Temperaturabnahme. Dadurch können in einigen

Höhenbereichen lokal Temperaturen unterhalb von T_{NAT} oder sogar unterhalb von T_{EIS} erreicht werden, wie in Abb.7.1 schematisch dargestellt wird.

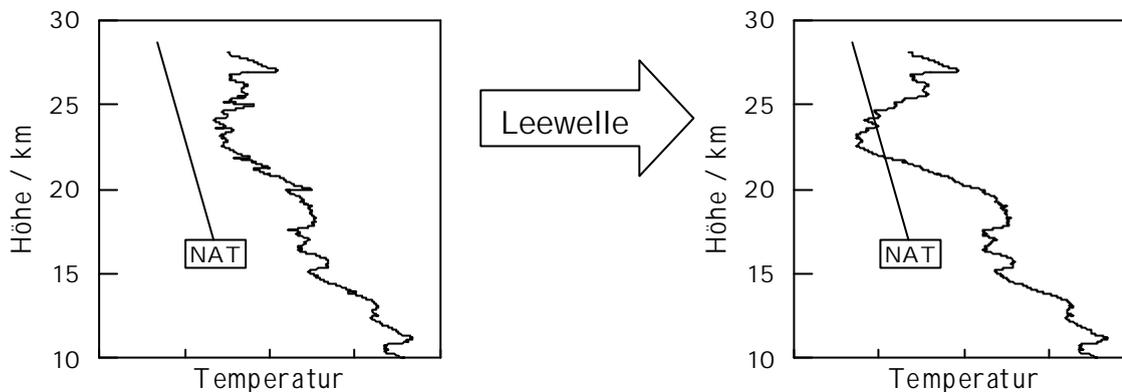


Abb.7.1: Das Prinzip der Leewellen-induzierten PSCs: einzelne Höhenbereiche kühlen adiabatisch ab und erreichen eine Temperatur $T < T_{NAT}$.

7.3 Zusammenhang von PSCs und Spurengas-Schwankungen

Die Bildung von PSC-Partikeln ist abhängig von der Temperatur. Die PSC-Partikel sind stabil unterhalb der NAT-Existenztemperatur T_{NAT} für feste NAT-Teilchen, unterhalb der STS-Existenztemperatur T_{STS} für flüssige STS-Tröpfchen und unterhalb des Eisgefrierpunktes T_{Eis} für Wassereispartikel des PSC Typs II. Diese Existenztemperaturen sind nicht nur druck- und damit höhenabhängig, sie hängen auch vom Anteil verschiedener Spurengase in der Atmosphäre ab. So hat z.B. eine Erhöhung des H_2O -Mischungsverhältnisses eine höhere NAT-Existenztemperatur zur Folge, was in Abb.7.2 schematisch dargestellt ist.

Nach Gleichung [Gl.3.6] wird der Eisgefrierpunkt maßgeblich durch den Wasserdampf-Partialdruck $p(H_2O)$ und damit durch das Wasserdampf-Mischungsverhältnis m_{H_2O} bestimmt. Für die NAT-Existenztemperatur ergibt sich nach Gleichung [Gl.3.7] zusätzlich zu der Abhängigkeit vom stratosphärischen Wasserdampf auch eine Relation zum Salpetersäure-Mischungsverhältnis m_{HNO_3} .

Für die bisherigen Betrachtungen wurde zur Berechnung der Existenztemperaturen, wie allgemein üblich (Schiller et al., 1996; Tsias et al., 1999), in der Stratosphäre ein konstantes Wasserdampf-Mischungsverhältnis von $m_{H_2O} = 5$ ppmv angenommen. Eine Änderung des H_2O -Mischungsverhältnisses hat die in Tab.7.1 aufgeführten Änderungen des Eisgefrierpunktes und der NAT-Existenztemperatur zur Folge.

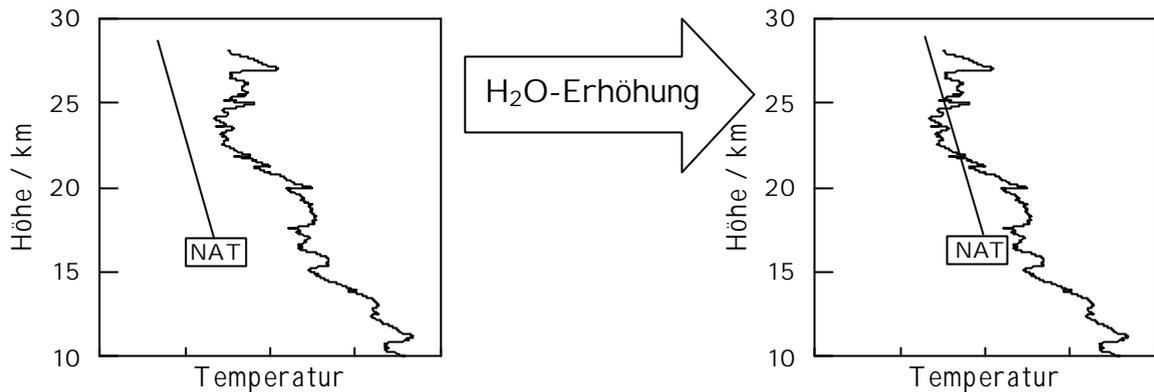


Abb.7.2: Das Prinzip mesoskaliger PSC-Ereignisse aufgrund einer Erhöhung des H_2O -Mischungsverhältnisses: lokal kann die Temperatur T die NAT-Existenztemperatur T_{NAT} unterschreiten, so dass die Existenzbedingungen für PSCs erfüllt sind.

$\text{H}_2\text{O}/\text{ppmv}$	HNO_3/ppbv	T_{Eis}/K	T_{NAT}/K
5.0	5	185.5	192.1
5.0	10	185.5	193.0
5.0	20	185.5	194.0
6.0	5	186.5	192.8
6.0	10	186.5	193.8
6.0	20	186.5	194.7

Tab.7.1: Abhängigkeit des Eisgefrierpunkts T_{Eis} und der NAT-Existenztemperatur T_{NAT} vom H_2O - bzw. HNO_3 - Mischungsverhältnis für einen Druck von $p = 30 \text{ hPa}$ ($\approx 23 \text{ km}$).

Aus Tab.7.1 geht auch hervor, dass T_{NAT} zusätzlich vom HNO_3 -Mischungsverhältnis abhängig ist, allerdings in geringerem Maße als von der H_2O -Konzentration. Erst eine Verdopplung des HNO_3 -Gehalts führt zu einer Erhöhung der NAT-Existenztemperatur um $\Delta T_{\text{NAT}} = 1 \text{ K}$. Solche extrem starken Schwankungen in der Salpetersäure-Konzentration sind nicht zu erwarten. In dieser Arbeit wird für die Berechnung der NAT-Existenztemperatur das in Abb.7.3 gezeigte HNO_3 -Profil verwendet. Es entspricht dem parametrisierten zonalen Monatsmittel für Januar 1979 bei 76° N , wobei die Werte auf LIMS-Messungen basieren (Gille und Russell, 1984).

Größere Schwankungen des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses sind hingegen durchaus möglich, beispielsweise wenn es durch Sedimentation von PSC-Partikeln zur Dehydrierung stratosphärischer Schichten kommt.

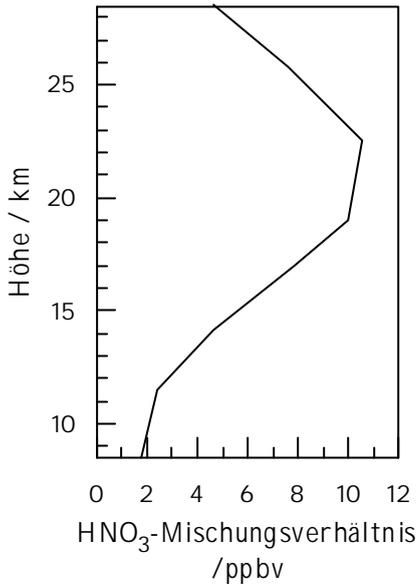


Abb.7.3: Das im Rahmen dieser Arbeit für die Berechnung von T_{NAT} verwendete Höhenprofil des HNO_3 -Mischungsverhältnisses.

Die Abhängigkeit der Existenztemperaturen vom Wasserdampf sind bedeutend. So liegt z.B. der Eisgefrierpunkt um $\Delta T_{Eis} = 1 \text{ K}$ höher, wenn sich das H_2O -Mischungsverhältnis um $\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ ppmv}$ erhöht. Während in Tabelle 7.1 nur das Druckniveau 30 hPa berücksichtigt wird, zeigen die Abbildungen 7.4 und 7.5 die Verschiebung der Existenztemperaturen bei Änderung des H_2O -Mischungsverhältnisses über den gesamten PSC-relevanten Höhenbereich.

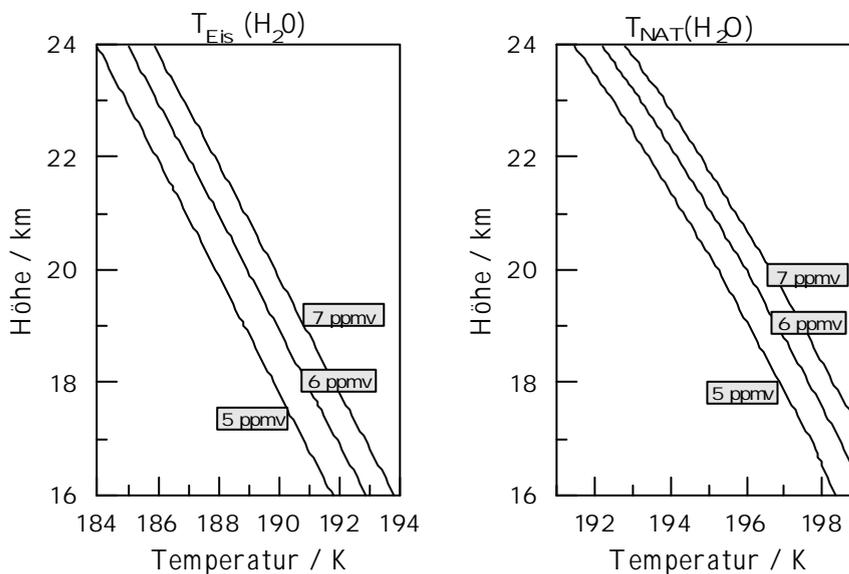


Abb.7.4 und 7.5: Abhängigkeit vom H_2O -Mischungsverhältnis in der unteren Stratosphäre, von Eisgefrierpunkt T_{Eis} [links] und NAT-Existenztemperatur T_{NAT} [rechts].

Die beschriebenen Mechanismen, das lokale Abkühlen einerseits und die Erhöhung der Existenztemperaturen andererseits, bilden die Grundlage für die Betrachtungen mesoskaliger Prozesse in den nächsten Kapiteln.