

Kapitel 6

PSC-Meßergebnisse: Makroskalige Interpretation

Wie im vorangegangenen Kapitel deutlich wurde, ist die arktische Stratosphäre von Winter zu Winter durch große Variabilität gekennzeichnet. Diese Variabilität bezieht sich auf Stratosphärenwärmungen und die resultierende Temperaturverteilung, damit auch auf die Existenzbedingungen für polare Stratosphärenwolken, die darauf folgende Chlor-Aktivierung und den Ozonabbau im Frühjahr. In diesem Kapitel sollen die beobachteten PSCs in ihrem synoptischen Zusammenhang erklärt werden.

Während der Meßwinter 1997/1998 und 1998/1999 waren nur in sehr kurzen Zeiträumen die meteorologischen Bedingungen zur PSC-Entstehung gegeben, so dass hier zunächst der Schwerpunkt auf einer statistischen Auswertung der PSCs liegt, die im Winter 1999/2000 in Ny-Ålesund gemessen wurden. Anschließend werden einzelne PSC-Ereignisse untersucht und den verschiedenen PSC-Typen bzw. Mischungen von PSC-Typen zugeordnet.

6.1 Ny-Ålesund PSC-Beobachtungen im Winter 1999/2000

Aus den in Kapitel 5.4 erläuterten meteorologischen Analysen der Stratosphäre läßt sich entnehmen, daß insbesondere der Winter 1999/2000 als herausragendes Beispiel für einen stabilen Polarwirbel angesehen werden kann. Während dieses Winters traten, bedingt durch die niedrigen Temperaturen, über eine lange Zeitperiode polare Stratosphärenwolken auf, die synoptisch zu erklären sind. Da es in diesem Winter kein Lidarsystem mehr in Sodankylä gab, werden im folgenden ausschließlich die PSC-Beobachtungen aus Ny-Ålesund analysiert.

Ohne Berücksichtigung des PSC-Typs ist in Abb.6.1 der Höhenbereich der in Ny-Ålesund beobachteten PSCs während des Winters dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Untergrenze der Stratosphärenwolken im Laufe des Winters absinkt. Während zu Beginn

des Winters im Dezember und Januar die Wolkenschicht oberhalb von 20 km gemessen wird, treten die PSCs im Februar 2000 in Höhen zwischen 11 und 18 km auf. Ein solches Absinken der PSC-Unterkante im Laufe eines Winters wurde bereits in vorangegangenen stabilen Wintern beobachtet. Zum Teil ist bei den Messungen sehr niedriger PSCs gegen Ende des Winters keine Trennung zwischen troposphärischen Cirruswolken und stratosphärischen Wolken mehr möglich. Solche Fälle sind vergleichbar mit entsprechenden Beobachtungen in der Antarktis (Guzzi *et al.*, 2000).

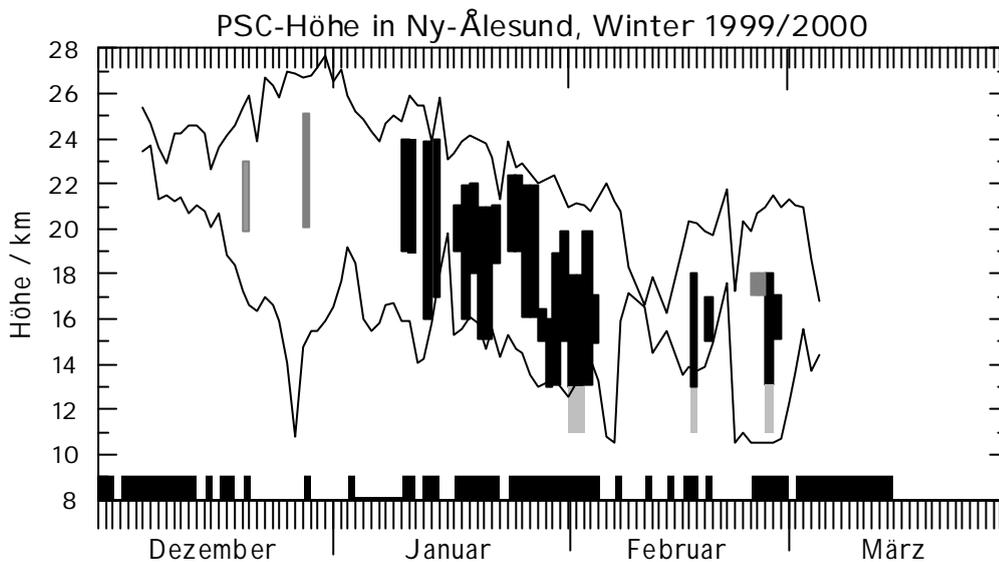


Abb.6.1: Zeitliche Entwicklung der PSC-Höhe im Winter 1999/2000 über Ny-Ålesund ohne Berücksichtigung des PSC-Typs, gemessen bei 532 nm [schwarze Balken] bzw. 353 nm [graue Balken]. Zusätzlich sind die obere und die untere Grenze mit $T < T_{NAT}$ [schwarze Linie] und die Meßtage [schwarze Skalenmarkierung] eingezeichnet.

Die Tatsache, dass sowohl die PSCs als auch $T < T_{NAT}$ im Laufe des Winters in abnehmender Höhe beobachtet werden, hängt mit der großskaligen Dynamik der Stratosphäre zusammen. Wie in Kapitel 2 erläutert, kommt es im Innern des polaren Wirbels zu einer diabatischen Abkühlung, die zur Folge hat, dass die Luft im Polarwirbel absinkt und dabei weiter abkühlt. Das Kältegebiet des Wirbels breitet sich so mit der Zeit nach unten aus. Die Höhe, in der eine bestimmte Temperatur gemessen wird, ist daher zum Ende eines Winters niedriger als zu Beginn eines Winters. Diese zeitliche Temperaturentwicklung ist anhand von Radiosondendaten in Abb.6.2 dargestellt. Das Absinken der Isothermen ist in den Ny-Ålesund Radiosondendaten gut zu erkennen, weil die Station während des gesamten Winters im Zentrum des Polarwirbels liegt und daher keine Störeffekte durch die Dynamik des Wirbelrands auftreten.

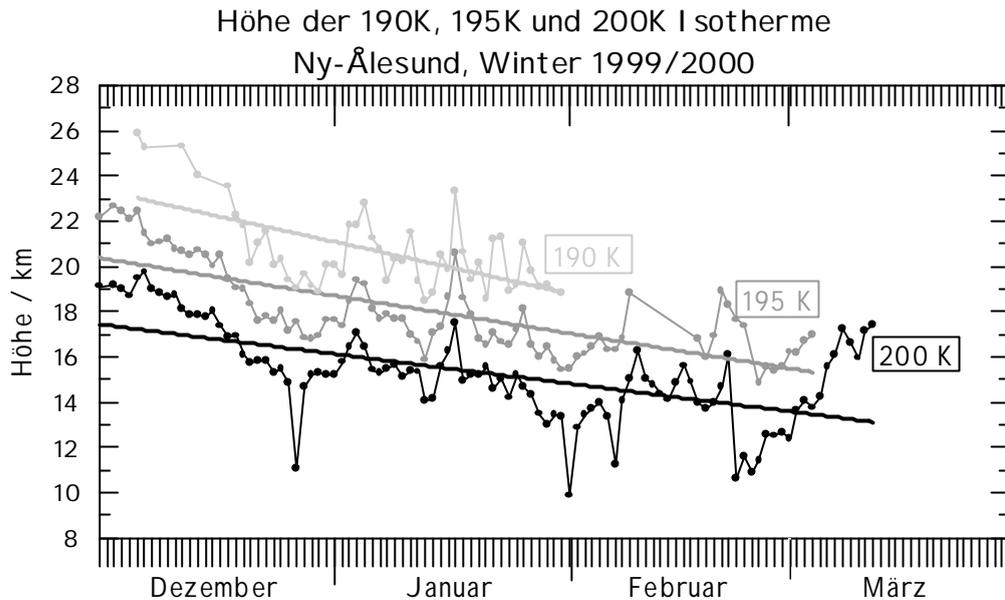
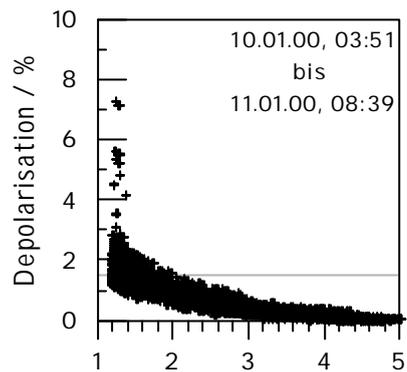


Abb.6.2: Zeitlicher Verlauf der untersten Höhe, bei der 200 K [schwarz], 195 K [dunkelgrau] und 190 K [hellgrau] mit den Radiosonden in Ny-Ålesund gemessen wurden. Die „Ausreißer“ der 200K-Isotherme ergeben sich durch niedrige Temperaturen im Zusammenhang mit einer hohen Tropopause. Die durchgezogenen Linien entsprechen jeweils der Linearregression.

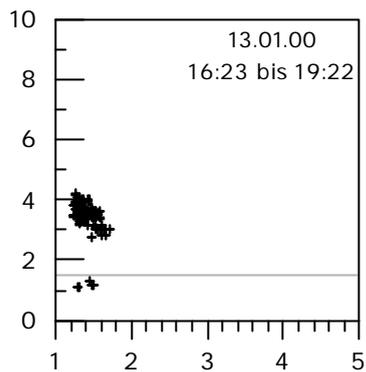
Für die weiteren Untersuchungen werden die im Winter 1999/2000 gemessenen PSCs nach verschiedenen PSC Typen unterteilt. Um Aussagen über den gemessenen PSC-Typ machen zu können, wird neben dem Rückstreuverhältnis auch die Depolarisation benötigt. Daher werden im folgenden nur diejenigen PSC-Ereignisse betrachtet, für die Messungen im parallel und senkrechten Kanal der Wellenlänge $\lambda = 532\text{nm}$ vorliegen. Die PSC-Daten werden zudem nicht immer nach einzelnen Tagen eingeteilt, da es sinnvoll erscheint, zusammenhängende PSC-Messungen, die während einer Meßnacht stattfanden, zu einem PSC-Ereignis zusammenzufassen.

Um einen Überblick über die gemessenen PSC-Ereignisse zu erlangen, sind in den folgenden Abbildungen 6.3.a-q jeweils Rückstreuverhältnis und Volumendepolarisation aus den einzelnen Messungen aufgetragen. Es wurden dabei alle PSC-Höhen mit $R > 1.2$ berücksichtigt, bei einer Höhenauflösung von $D_z = 150\text{ m}$. Zu beachten ist die andere Skaleneinteilung der Volumendepolarisation am 18.Jan., sowie am 24./25.Jan. und 26./27.Jan.2000 (Abb.6.3.e, 6.3.i und 6.3.j). In jeder der Abbildungen markiert eine graue Linie den Wert der Moleküldepolarisation bei $d^{Vol} = 1.44\%$.

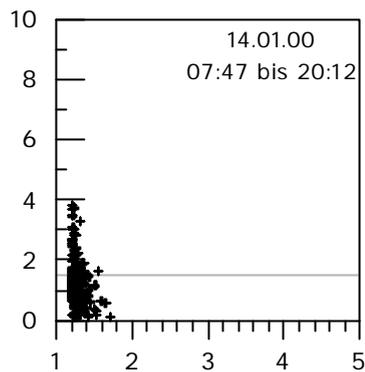
Die optischen Eigenschaften der verschiedenen PSC-Ereignisse sind zum Teil sehr unterschiedlich, wie beispielsweise bei einem Vergleich zwischen dem 10./11. Jan. (Abb.6.3.a) und dem 24./25.Jan.2000 (Abb.6.3.i) deutlich wird.



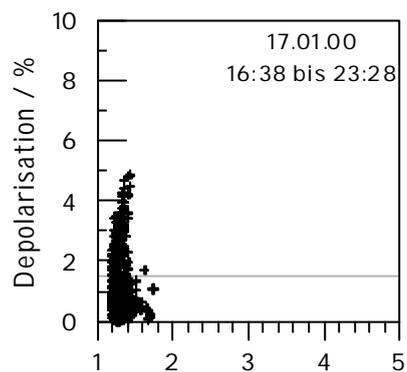
[Abb.6.3.a]



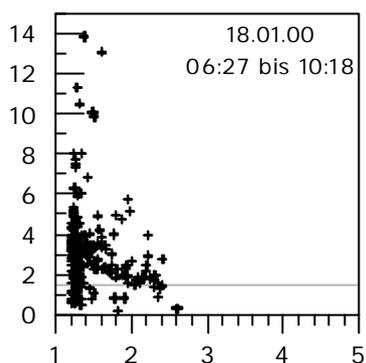
[Abb.6.3.b]



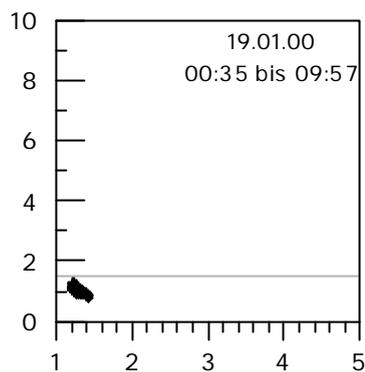
[Abb.6.3.c]



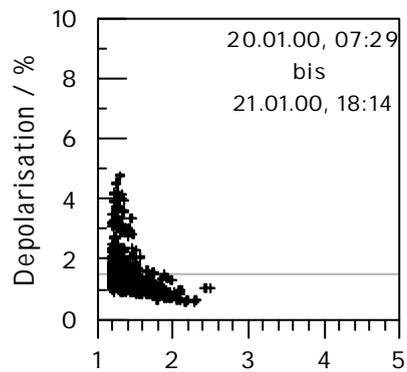
[Abb.6.3.d]



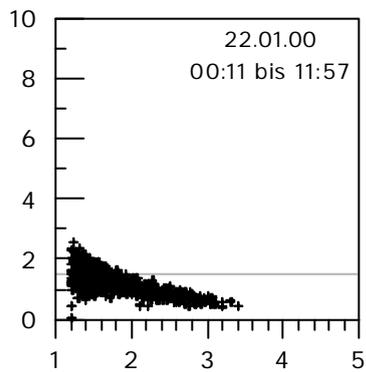
[Abb.6.3.e]



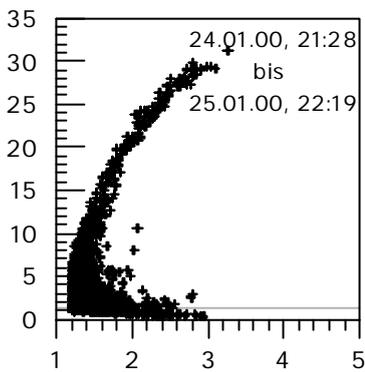
[Abb.6.3.f]



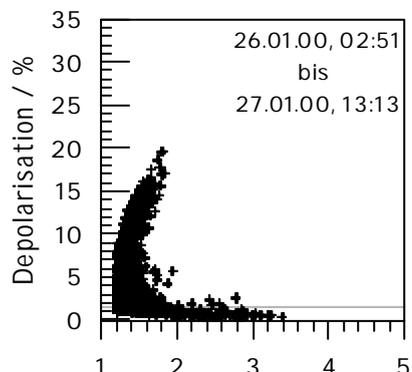
[Abb.6.3.g]



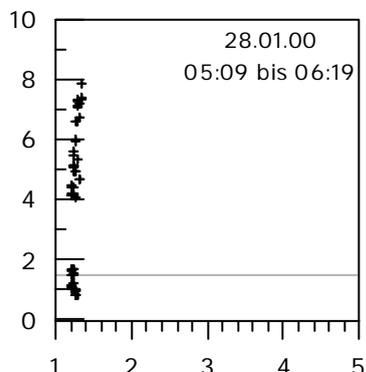
[Abb.6.3.h]



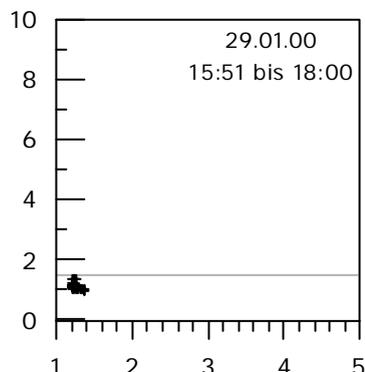
[Abb.6.3.i]



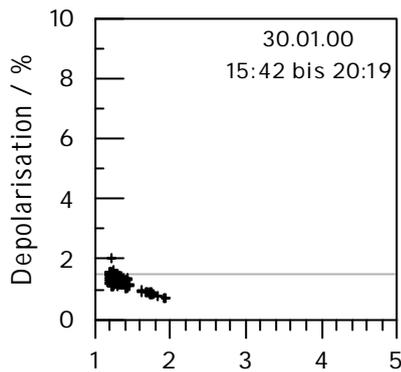
[Abb.6.3.j]



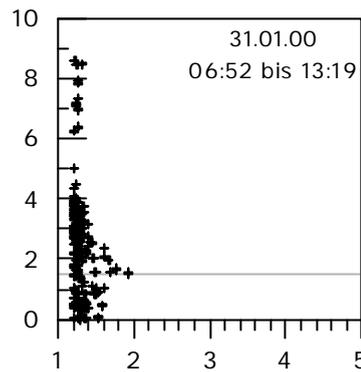
[Abb.6.3.k]



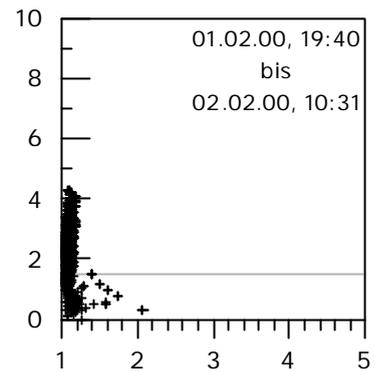
[Abb.6.3.l]



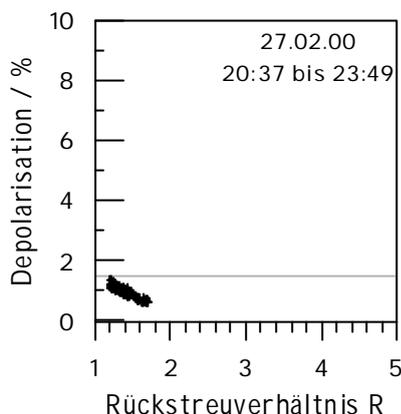
[Abb.6.3.m]



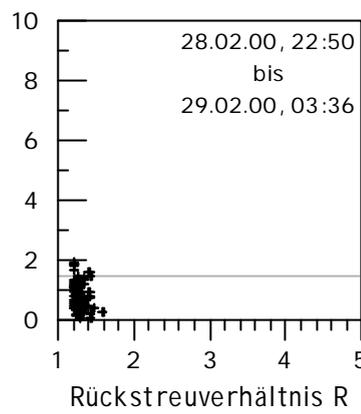
[Abb.6.3.n]



[Abb.6.3.o]



[Abb.6.3.p]



[Abb.6.3.q]

Abb.6.3.a-q: Lidarmessungen von polaren Stratosphärenwolken über Ny-Ålesund vom 10./11. Jan. bis 28./29. Feb. 2000. Aufgetragen ist jeweils die Volumendepolarisation gegen das Rückstreuverhältnis, beruhend auf den Messungen im 532 nm parallel bzw. senkrecht polarisierten Kanal. Die graue Linie bei $d^{Vol} = 1.44\%$ markiert die Moleküldepolarisation. Zu beachten ist die andere Skaleneinteilung der Volumendepolarisation am 18. Jan. [6.3.e], 24./25. Jan. [6.3.i] und am 26./27. Jan. 2000 [6.3.j].

Die Lidardaten der PSC-Ereignisse vom 03./04. Feb., 17. Feb. und 19. Feb. 2000 (vgl. Tab.4.4 in Kap.4.6.3) sind hier nicht aufgeführt. Ihr Rückstreuverhältnis lag jeweils unter $R = 1.1$, sie wurden aufgrund der detektierten Volumendepolarisation als PSCs aus flüssigen bzw. festen Partikeln identifiziert.

Anhand der Darstellung der einzelnen PSC-Ereignisse in den Abbildungen 6.3.a-q lassen sich Aussagen über deren Partikelbeschaffenheit treffen. Im folgenden werden die verschiedenen PSC-Typen und ihre Mischungen anhand von Fallbeispielen erläutert.

6.2 Flüssige PSC-Partikel: PSC Typ I b

Der Mie-Theorie entsprechend haben PSCs aus flüssigen Tröpfchen geringe Volumendepolarisationswerte d^{Vol} , die unterhalb der Moleküldepolarisation d^{MOL} liegen, also $d^{Vol} < d^{MOL}$. Ein prägnantes Beispiel für eine solche PSC vom Typ I b ist das PSC-Ereignis vom 10./11. Jan. 2000 (Abb.6.3.a). Das Lidar-Rückstreuprofil und die zugehörige Volumendepolarisation einer 10-minütigen Einzelmessung dieses PSC-Ereignisses sind in Abb.6.4.a+b dargestellt. Außerdem ist in Abb.6.4.c das Temperaturprofil der Radiosonde um 11:00 UTC gezeigt, wobei die Existenztemperaturen von NAT, STS und Eis gekennzeichnet sind.

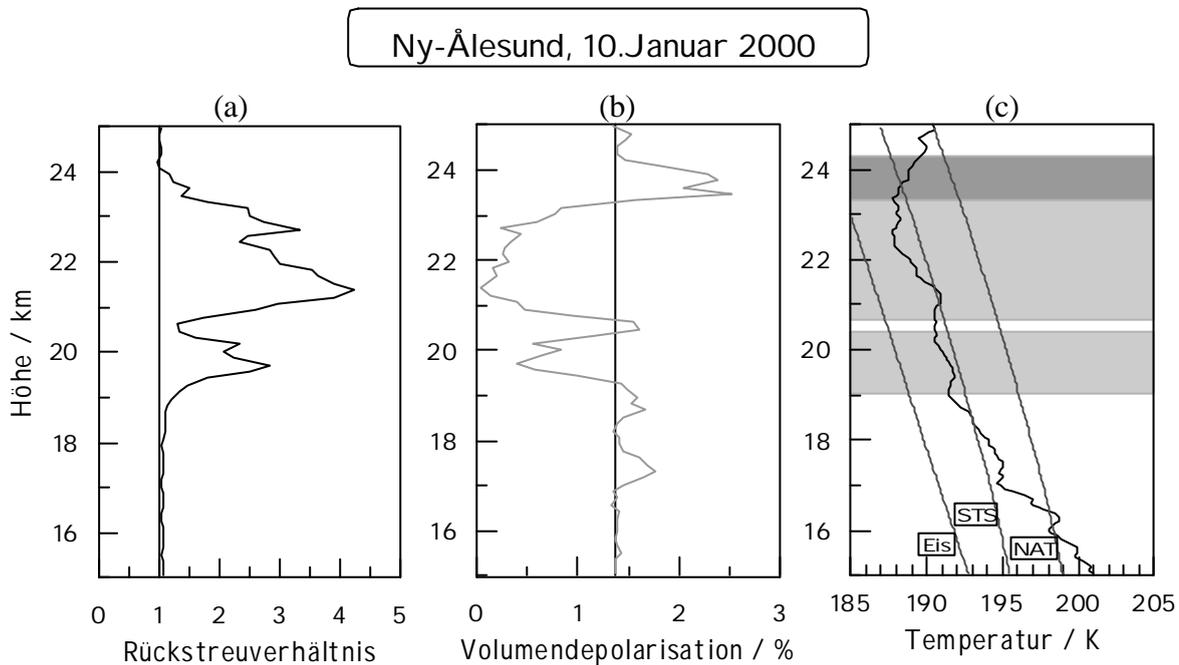


Abb.6.4: Rückstreuverhältnis [a] und Volumendepolarisation [b] einer Lidarmessung in Ny-Ålesund, 10-minütiges Mittel am 10. Jan. 2000, 15:01-15:11 UTC. Dazu das Temperaturprofil der Radiosonde vom 10. Jan. 2000, 11:00 UTC [c], mit den Existenztemperaturen von NAT, STS und Eis, sowie Markierungen für die detektierten PSCs vom Typ I b [hellgrau hinterlegt] und Typ I a [dunkelgrau hinterlegt].

Aerosolpartikel mit einem Rückstreuverhältnis von $R > 1.2$ werden zwischen 19 und 24 km detektiert. Anhand der Volumendepolarisation läßt sich jedoch feststellen, dass es sich um mehrere Schichten mit unterschiedlichen Partikeleigenschaften handelt. Mit hohen Rückstreuverhältnissen $R = 2$ bis 4 bei gleichzeitiger Volumendepolarisation, die kleiner als die Moleküldepolarisation ist, kann man hier die flüssigen PSC-Partikel des PSC Typs I b in 2 Schichten erkennen. Die untere Schicht liegt zwischen etwa 19.0 und 20.4 km, die obere Schicht zwischen etwa 20.6 und 23.2 km. Die untere Schicht ist etwas

schwächer ausgeprägt: die Rückstreuverhältnisse reichen hier nur bis etwa $R \approx 3$, die Volumendepolarisation ist höher als in der oberen Schicht. Daraus folgt, dass die obere PSC I b entweder mehr sphärische Tröpfchen oder aber größere Tröpfchen als die untere, schwächere PSC I b enthält. Aufgrund der Temperatur in den PSC-Schichten ist davon auszugehen, dass es sich um größere Tröpfchen handelt. Wie dem Temperaturprofil in Abb.6.4.c zu entnehmen ist, ist die Temperatur T_{STS} für die Existenz von Tröpfchen aus ternären $[\text{H}_2\text{O}/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4]$ -Lösungen über den gesamten PSC I b –Höhenbereich unterschritten. Während in der unteren Schicht T_{STS} um etwa 1 K unterschritten ist, liegt die Temperatur in der oberen Schicht etwa 2 K unterhalb von T_{STS} . Wie in Kapitel 4.3.1 erläutert wurde, wachsen die STS-Tröpfchen unterhalb von T_{STS} stark an, und zwar um so stärker, je niedriger die Temperatur unter T_{STS} liegt. Daher sind bei $(T_{STS} - 2\text{K})$ größere STS-Tröpfchen zu erwarten als bei $(T_{STS} - 1\text{K})$. Beide PSC I b –Schichten sind so mikrophysikalisch zu erklären. Schon in Abb.6.3.a ist zu erkennen, dass nicht ausschließlich alle Partikel die Bedingung für flüssige Partikel $d^{Vol} < d^{MOL}$ erfüllen, dass also auch feste Teilchen vorhanden sind. Diese festen Teilchen sind oberhalb der PSC vom Typ I b zu finden, zwischen etwa 23 und 24 km. Entsprechend der R - und d^{Vol} -Werte kann diese Schicht als PSC Typ I a klassifiziert werden. Diese Einteilung wird durch die Temperatur gestützt, die im entsprechenden Höhenbereich zwar oberhalb von T_{STS} , aber unterhalb von T_{NAT} liegt und somit die Existenzbedingung für NAT-Partikel erfüllt. Die festen Partikel des PSC Typs I a werden im folgenden Abschnitt analysiert.

6.3 Feste PSC-Partikel: PSC Typ I a (*enhanced*)

Die PSC vom Typ I a sind dadurch zu identifizieren, dass sie aus festen Teilchen bestehen und daher eine Volumendepolarisation aufweisen, die größer als die Moleküldepolarisation ist. In der ursprünglichen Klassifizierung wurden PSC-Schichten mit einem Rückstreuverhältnis bis $R < 1.5$ dem PSC Typ I a zugeordnet (*Browell et al., 1990*). Später zeigte sich, dass die festen Partikel unter bestimmten Temperaturbedingungen durch die Aufnahme von HNO_3 aus der Gasphase stark anwachsen können. Diese größeren Partikel bilden die Unterkategorie Typ I a *enhanced*, mit Rückstreuverhältnissen ähnlich denen des PSC Typs I b mit $R = 2$ bis 5 (*Stein et al., 1999; Tsias et al., 1999; Reichardt et al., 2000*). In dieser Arbeit wird diese Unterteilung in den PSC Typ I a und Typ I a *enhanced* aufgehoben. Anlaß hierzu geben die folgenden Überlegungen zu den Lidarmessungen vom 24. bis 27. Jan.2000 in Ny-Ålesund.

Feste Partikel des Typs I a weisen geringe Rückstreuverhältnisse von $R < 1.5$ auf (z.B. Abb.6.3.d mit Meßdaten vom 17.Jan.2000). Kommt es jedoch aufgrund der langen Zeitdauer der Partikel bei Temperaturen unterhalb von T_{NAT} zu einer verstärkten

HNO₃-Aufnahme aus der Gasphase, so wachsen die Teilchen an und ihr Rückstreuverhältnis wird größer. Meßdaten hierzu sind in den Abbildungen 6.3.i und 6.3.j vom 24./25.Jan. bzw. 26./27. Jan. 2000 zu ersehen, bei denen Rückstreuverhältnisse bis $R = 3$ auftreten. Auffällig ist hier die sehr hohe Volumendepolarisation, die darauf zurückzuführen sind, dass in der detektierten Luftmasse entweder einige sehr große oder aber viele kleine asphärische Partikel vorhanden sind. Die Messungen vom 24./25.Jan. und 26./27. Jan. 2000 deuten zudem darauf hin, dass beim Partikelwachstum eine Sättigung der HNO₃-Aufnahme eintritt, die das Verhältnis von Volumendepolarisation und Rückstreuverhältnis begrenzt.

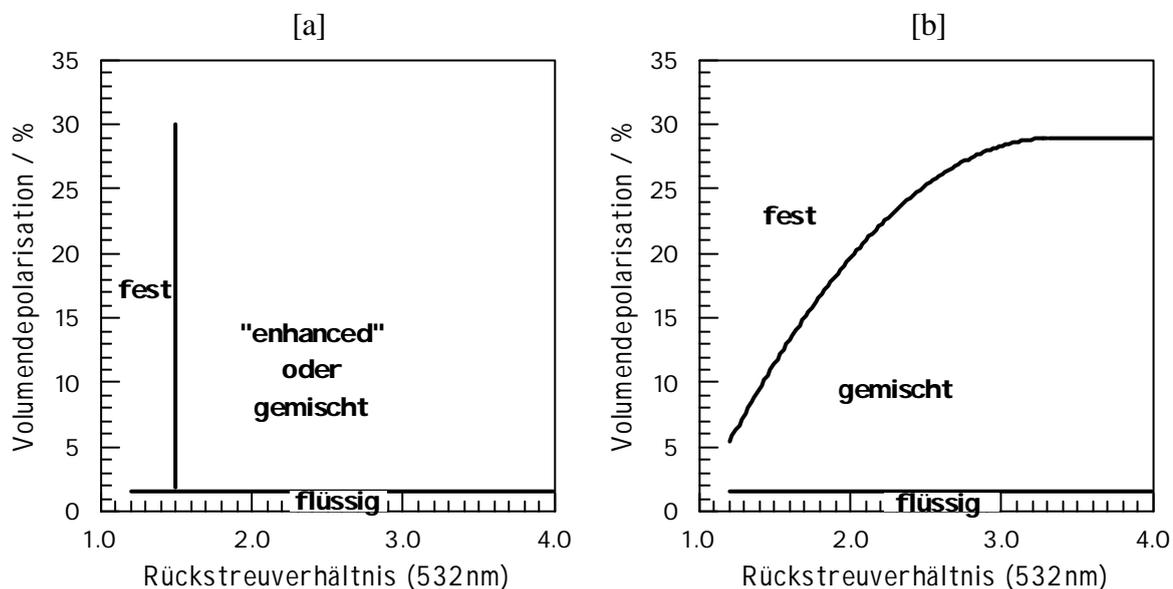


Abb.6.5: Klassifizierung der PSCs vom Typ I nach Lidar-Parametern. **[a]** Ursprüngliche Einteilung in Anlehnung an *Browell et al., 1990* und *Wedekind, 1997*. **[b]** Einteilung nach festen, flüssigen und gemischten Partikeln auf der Basis der Lidarmessungen vom 24/25. und 26/27.Jan.2000 in Ny-Ålesund.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine PSC-Klassifizierung vorgenommen, die in Abb.6.5.b schematisch dargestellt ist. Die Trennung zwischen den vorwiegend festen Teilchen und einer Mischung aus festen und flüssigen Partikeln ergibt sich aus einem Polynomfit zu den Meßdaten vom 24./25.Jan. und 26./27.Jan.2000. Der Polynomfit wurde numerisch ermittelt und ist gegeben durch $y = a + bx + cx^2$, mit $a = -27.422$, $b = 34.320$ und $c = -5.132$. Entsprechend dem in Abb.6.5.b gezeigten Klassifikations-Schema werden die PSCs vom Typ I für die weitere Analyse demnach wie folgt eingeteilt:

- feste Teilchen (Typ I a)
- flüssige Tröpfchen (Typ I b)
- Mischungen aus festen und flüssigen Teilchen (Typ I a+b).

PSCs vom Typ I a traten während des gesamten Winters 1999/2000 in verschiedener Stärke auf, beispielsweise am 14.Jan. (Abb.6.3.c) und am 31.Jan.2000 (Abb.6.3.n). Einige Typ I a PSCs gehören zu sogenannten „Sandwich-Strukturen“, die in Kapitel 6.4.2 erläutert werden.

6.3.1 Große NAT-Partikel, „NAT-Rocks“

Auch die am 24./25.Jan. und 26./27. Jan. 2000 beobachteten Stratosphärenwolken mit den sehr hohen Volumendepolarisationswerten werden als PSCs vom Typ I a klassifiziert. Allerdings spielen sie aufgrund ihrer Partikeleigenschaften eine besondere Rolle.

Da die Berechnung von Partikel-Größenverteilungen auf die Mie-Theorie zurückgeht und nur für sphärische Partikel gilt, ist hier eine Bestimmung der Teilchengröße mittels der Lidarmessungen aus Ny-Ålesund nicht möglich. Es ist jedoch anzunehmen, dass es sich bei den detektierten festen Teilchen um die in Kapitel 3.5.1 beschriebenen selektiv angewachsenen Typ I a –Partikel handelt.

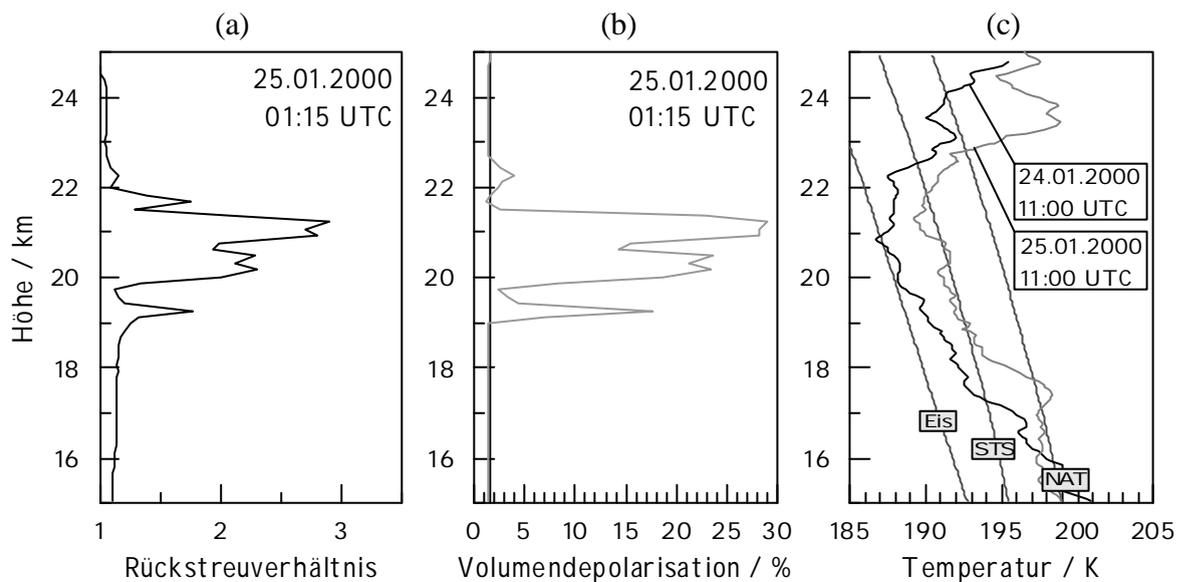


Abb.6.6: Rückstreuverhältnis [a] und Volumendepolarisation [b] einer Lidarmessung in Ny-Ålesund, 10-minütiges Mittel am 25.Jan.2000, 01:15-01:26 UTC. Dazu die Temperaturprofile der Radiosonden vom 24.Jan. [schwarz] und 25.Jan.2000 [grau], jeweils 11:00 UTC [c], mit den Existenztemperaturen von NAT, STS und Eis.

Eine 10-minütige Einzelmessung des sehr stark ausgeprägten PSC Typ I a –Ereignisses vom 24./25.Jan.2000 ist in Abb.6.6 dargestellt. Gezeigt werden das Rückstreuverhältnis und die Volumendepolarisation, sowie in Abb.6.6.c die Temperaturprofile der Radiosonden vom 24. und 25.Jan.2000, jeweils 11:00 UTC, zusammen mit den Existenztemperaturen von NAT, STS und Eis. Aus den Temperaturprofilen ist zu entnehmen, dass sich die gesamte untere Stratosphäre über Ny-Ålesund zwischen den

beiden Radiosondenaufstiegen erwärmt hat. Das starke PSC Typ I a –Ereignis wurde gerade zwischen diesen beiden Temperaturmessungen beobachtet. Das Temperaturprofil vom 24.Jan.2000, 11:00 UTC, weist bei etwa 21 km Höhe Temperaturen unterhalb des Eisgefrierpunktes auf. Es ist davon auszugehen, dass die Temperatur auch zum Zeitpunkt der Lidarmessung noch nahe am Eisgefrierpunkt war – eine Voraussetzung für das selektive Wachstum großer NAT-Partikel, die durch Sedimentation zu Denitrifizierung führen.

Solche großen NAT-Partikel, auch „NAT-Rocks“ genannt, wurden während der SOLVE-Kampagne im Januar 2000 im arktischen Wirbelzentrum *in-situ* gemessen. Instrumente an Bord des amerikanischen Forschungsflugzeugs ER-2 detektierten NO_y und HNO_3 (in der Gasphase und in Aerosolen), wobei zwischen Aerosolteilchen mit einem Durchmesser größer bzw. kleiner $2 \mu\text{m}$ unterschieden werden konnte. Bei Flügen zwischen Kiruna (Schweden) und dem Nordpol wurden so in einer Höhe von 16 bis 21 km Partikel gemessen, deren Durchmesser größer als $2 \mu\text{m}$ war. Obwohl die genauen Nukleationsprozesse nicht bekannt sind, lassen sich Wachstum und Sedimentation der großen NAT-Partikel mit einem mikrophysikalischen Modell simulieren. Die Berechnungen ergeben, daß die detektierten Partikel einen Durchmesser von $\varnothing = 10$ bis $20 \mu\text{m}$ haben und bereits vor der Messung sedimentiert sind (Fahey, 2001). Die Partikel erfahren über eine lange Zeitperiode Temperaturen unterhalb von T_{NAT} , wobei sie auch Zeiten mit $T > T_{\text{NAT}}$ „überleben“, wenn die Partikel ausreichend groß sind. Die Sedimentation beginnt bereits während des Partikelwachstums.

Da HNO_3 und H_2O nur in begrenzter Menge verfügbar sind, ist es nicht möglich, dass das gesamte Hintergrundaerosol zu großen Partikeln anwächst. Es findet daher selektives Partikelwachstum statt. Die Frage, welche Partikel selektiv anwachsen, kann dabei von der Gefriertrate bei der NAT-Bildung unterhalb von etwa 197 K abhängen oder von der andersartigen Komposition einzelner Nuklei. Während das Hintergrundaerosol Anzahlkonzentrationen von 10 cm^{-3} aufweist, treten die großen NAT-Partikel nur mit Konzentrationen von 10^{-4} cm^{-3} auf (Fahey et al., 2001).

Die Denitrifizierung des arktischen Wirbels während eines Winters ist von der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung der sedimentierenden Partikel-Population abhängig. Während des Winters 1999/2000 wurden sedimentierende große NAT-Partikel beobachtet (Fahey et al., 2001) und die damit einhergehende Denitrifizierung (Santee et al., 2000).

Selten treten die festen Partikel des PSC Typs I a oder die flüssigen Tröpfchen des PSC Typs I b ausschließlich auf. Auf die Möglichkeiten gemischter PSC-Ereignisse wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

6.4 Mischungen fester und flüssiger Partikel

Den Abbildungen 6.3.a-q ist unter Anwendung der Klassifizierung aus Abb.6.5.b zu entnehmen, dass die meisten PSC-Ereignisse nicht reine Typ I a oder reine Typ I b – Partikel aufweisen. In den meisten Fällen werden sowohl feste als auch flüssige Partikel beobachtet, jeweils zu verschiedenen Anteilen. Die Ursache dafür sind entweder tatsächliche Wolkenmischungen, die sowohl aus festen als auch aus flüssigen Partikeln bestehen („Typ a/b-Mischung“), oder aber PSCs aus festen bzw. flüssigen Partikeln, die gleichzeitig in unterschiedlichen Höhen gemessen werden („Sandwich-Struktur“).

6.4.1 Typ I a/b – Mischung

Bei der Partikelbildung (s.Kap.3.4.1) bilden sich bei ausreichend niedrigen Temperaturen Eiskeime in den vorhandenen Aerosol-Tröpfchen. In Abhängigkeit von der Größe des Eiskeims, je nachdem ob er Kontakt zur Umgebungsluft hat oder nicht, bleiben die Tröpfchen bei steigender Temperatur flüssig, oder sie lagern an der festen Außenfläche NAT an und bilden so ein festes NAT-Partikel. Je nach Temperaturgeschichte müssen nicht alle Partikel eines Luftpakets ausschließlich fest oder ausschließlich flüssig sein. Es können auch Mischwolken entstehen, in denen flüssige und feste Partikel koexistieren.

Anhand der Lidarmessungen aus Ny-Ålesund zeigten *Biele et al.(2001)*, dass viele der detektierten PSC Typ I b nicht ausschließlich aus flüssigen Partikeln bestehen, sondern sich vielmehr aus flüssigen Tröpfchen und einem Bruchteil fester Partikel zusammensetzen. Diese Mischwolken besitzen ein hohes Rückstreuverhältnis im parallelen Kanal, das durch die Mie-Streuung an Tröpfchen zustande kommt. Gleichzeitig ist jedoch auch ein leicht erhöhtes Rückstreuverhältnis im senkrechten Kanal vorhanden, was durch vereinzelte feste Partikel zustande kommt. Eine Koexistenz von flüssigen Tröpfchen und festen NAT-Partikeln ist möglich, wenn sich die NAT-Partikel nicht im Gleichgewicht mit der Gasphase befinden. Modellrechnungen bestätigen die Annahme, dass solche Nicht-Gleichgewichts-Partikelverteilungen entstehen, wenn ausreichend große Temperaturänderungen der aerosolhaltigen Luftmassen die Teilchen davon abhält, eine ihrem Gleichgewicht entsprechende Größe anzunehmen. Statistische Untersuchungen zeigen, dass in Ny-Ålesund etwa 30% aller PSCs vom Typ I b neben den flüssigen Tröpfchen auch einen geringen Anteil fester Partikel enthalten (*Biele et al., 2001*).

Gleichermaßen ist denkbar, dass es PSCs vom Typ I a gibt, die wenige flüssige Tröpfchen enthalten. Diese lassen sich jedoch mit dem Lidar nicht nachweisen, da das geringe Rückstreuverhältnis der Typ I a Wolken durch die Anwesenheit weniger Typ I b Tröpfchen nicht stark ansteigen kann. Im senkrecht polarisierten Kanal werden ohnehin ausschließlich die festen, polarisierenden Partikel detektiert. Es ist jedoch davon

auszugehen, dass es sich auch bei einem Teil der PSCs vom Typ I a tatsächlich um Mischungen von festen Partikeln mit wenigen flüssigen Tröpfchen handelt.

6.4.2 PSCs mit „Sandwich-Struktur“

Im Gegensatz zu den PSCs, in denen tatsächlich feste und flüssige Partikel gleichzeitig vorkommen, bestehen die sogenannten „Sandwich-PSCs“ (Shibata *et al.*, 1999 *a*, *b*), aus Schichten verschiedener Partikelarten. So wird in einem Höhenbereich eine PSC vom Typ I a beobachtet, während in einem anderen Höhenbereich eine PSC vom Typ I b vorliegt.

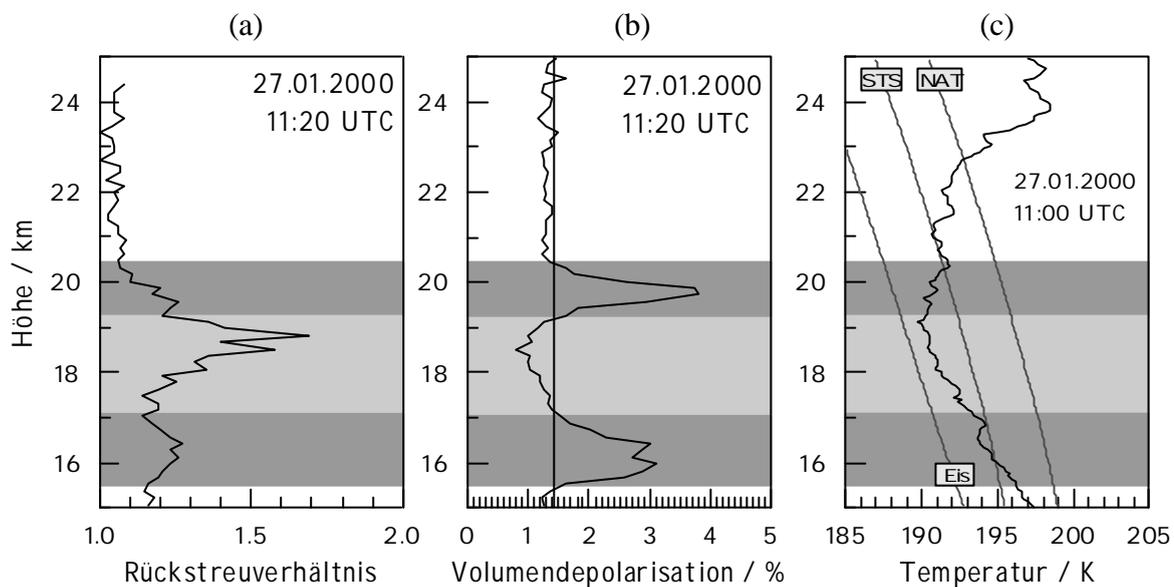


Abb.6.7: Rückstreuverhältnis [a] und Volumendepolarisation [b] einer Lidarmessung in Ny-Ålesund, 10-minütiges Mittel am 27.Jan.2000, 11:20-11:31 UTC. Dazu das Temperaturprofil der Radiosonde vom 27.Jan.2000, 11:00 UTC, mit den Existenztemperaturen von NAT, STS und Eis [c]. Schattiert ist jeweils der Höhenbereich der PSCs vom Typ I a [*dunkelgrau*] und vom Typ I b [*hellgrau*].

Schon das Beispiel des PSC Typ I b in Abb.6.4 stellt in diesem Sinne eine solche PSC mit Sandwich-Struktur dar, denn direkt über der PSC vom Typ I b befindet sich eine PSC vom Typ I a. Diese Struktur wird als „offene Sandwich-Struktur“ bezeichnet. Hingegen grenzt bei der üblichen Sandwich-Struktur eine PSC vom Typ I b sowohl oben als auch unten jeweils an eine PSC vom Typ I a. Ein solches PSC-Ereignis mit Sandwich-Struktur am 27.Jan.2000 ist in Abb.6.7 dargestellt. Anhand der Rückstreuverhältnisse und der Volumen-depolarisation läßt sich erkennen, dass hier eine Schicht aus flüssigen Aerosol-Tröpfchen zwischen etwa 17.1 und 19.2 km von jeweils einer Schicht aus festen Aerosolpartikeln bei 15.5 bis 17.1 km und bei 19.2 bis 20.5 km umgeben ist. Eine Erklärung liefert das entsprechende Temperaturprofil der Radiosondenmessung in

Abb.6.7.c. Die flüssigen Tröpfchen des PSC Typs I b sind genau dort zu finden, wo die Temperatur relativ zur STS-Existenztemperatur am niedrigsten ist.

Die Ursache der PSC-Bildung in Sandwich-Strukturen ist gerade die stratosphärische Temperaturverteilung relativ zu den STS- bzw. NAT-Existenztemperaturen (*Shibata et al., 1999 a*). In einer Luftmasse, in der sowohl feste als auch flüssige Partikel vorhanden sind (s.Kap.6.4.1), verläuft das Partikelwachstum bei stetiger Abkühlung in zwei Schritten. Bei Temperaturen unter T_{NAT} wachsen die festen Partikel durch Auffrieren von NAT. Dabei bleibt das Rückstreuverhältnis der Luftmasse klein, da es sich nur um wenige Teilchen handelt, hingegen nimmt die Volumendepolarisation zu. Sinkt die Temperatur unter T_{STS} , so wachsen die flüssigen Aerosol-Tröpfchen durch HNO_3 - und H_2O -Aufnahme sehr schnell an. Die flüssigen Tröpfchen dominieren das Rückstreuverhältnis, welches wegen der zunehmenden Größe der Partikel ansteigt. Gleichzeitig nimmt die Volumendepolarisation ab, da der Anteil der sphärischen Partikel im Luftvolumen größer ist. Im Höhenbereich der niedrigsten relativen Temperatur $[T-T_{EIS}]$ wird so die Volumendepolarisation d^{Vol} reduziert bei steigendem Rückstreuverhältnis R . An beiden Randbereichen dieser Region gibt es Temperaturbereiche, in denen das Wachstum der flüssigen Partikel nicht ausreicht, um R effektiv zu erhöhen bzw. d^{Vol} zu verringern. Unter diesen Bedingungen werden PSCs mit Sandwich-Strukturen beobachtet (*Shibata et al., 1999 a, b*).

Wenn das Temperaturprofil kleinskalige vertikale Strukturen hat, können Maxima des Rückstreuverhältnisses bei jedem Temperaturminimum auftreten, mit Maxima der Volumendepolarisation dazwischen. Neben dieser häufigsten Struktur der „Sandwich-PSCs“ werden auch PSCs mit offenen und inversen Sandwich-Strukturen beobachtet.

Alle beschriebenen PSC-Typen aus festen NAT-Partikeln und/oder flüssigen STS-Tröpfchen treten sowohl in Ny-Ålesund als auch in Sodankylä auf. Dennoch gibt es Unterschiede zwischen den beiden Stationen, die in ihrer relativen Lage zum polaren Wirbel begründet sind und zur Folge haben, dass die PSC-Ereignisse mit unterschiedlicher Häufigkeit bzw. unter anderen Bedingungen auftreten. Diese unterschiedlichen Bedingungen sind makroskalig nicht auflösbar und werden in den folgenden Kapiteln ausführlich erklärt.

