Fakultät
Meteorologie der Universität Hamburg

Bachelorarbeit

über das Thema

OceanRAIN Niederschlagsstatistik
- Eine Analyse der Klimazonen des Atlantischen Ozeans -

Autor: Marvin Kähnert
marvin.kaehnert@uni-hamburg.de

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Bühler

Zweitgutachter: Dr. Christian Klepp

Abgabedatum: 04.01.2016

OceanRAIN Niederschlagsstatistik
- Eine Analyse der Klimazonen des Atlantischen Ozeans -

Zusammenfassung

Niederschlag ist ein wesentlicher Bestandteil des globalen Energie- und Wasserkreislaufes und damit ein wichtiger Parameter des Klimasystems. Genaue Kenntnisse über die Verteilung und Intensität von Niederschlag sind daher für ein besseres Verständnis des Klimas oder dessen Modelle notwendig. Aufgrund der hohen örtlichen und zeitlichen Variabilität, stellen Niederschlagsmessungen über den Ozeanen eine große Herausforderung dar. Vor allem jedoch war das Fehlen an, auf Schiffen verlässlich funktionierenden, Messverfahren das größte Problem. Mit der Einführung optischer Messgeräte (Disdrometer) zur Erfassung von Niederschlag kann diesem Problem begegnet werden.

Das *Ocean Rainfall And Ice-phase precipitation measurement Network* (OceanRAIN) liefert hochqualitativ, mit optischen Disdrometern gewonnene in situ Messungen des Niederschlages über den Ozeanen. Diese Messungen erlauben eine separierte Betrachtung nach Klimazone, Phase oder Größenklassenverteilung und bieten somit tiefere Einblicke in die Eigenschaften von Niederschlag über den Ozeanen.

Ziel der Arbeit war die OceanRAIN Datensätze zweier Forschungsschiffe (FS Polarstern und FS Meteor) hinsichtlich des Parameters Niederschlag über dem Atlantischen Ozean zu untersuchen. Hierfür wurde eine differenzierte Betrachtung des Niederschlages getrennt nach Klimazonen, Phasen (Regen, Schnee, Mischphase) und klimatologischen Quartalen durchgeführt.

Es konnte eine Gammaverteilung der Niederschlagsraten in allen Klimazonen und für alle Phasen nachgewiesen werden.

Ferner stellte sich heraus, dass niederschlagsreiche (konvektive) Ereignisse selten sind, jedoch einen Großteil des als Niederschlag fallenden Wassers enthalten. Es zeigte sich, dass konvektive Niederschlagsereignisse, die weitgehend bei einer Ereignishäufigkeit von 10-15% lagen, zu mehr als 60-80% der Akkumulation beigetragen haben.

Die Messungen wurden von geringen Niederschlagsraten (Niesel) dominiert. Die maximalen Niederschlagsraten beider Forschungsschiffe wurden jeweils in den Tropen gemessen und betrugen 113,75 mm/h (FS Polarstern) und 157,15 mm/h (FS Meteor). Auffällig waren hohe Niederschlagsereignisse in den Subtropen der südlichen Hemisphäre, gemessen von der FS Meteor. Im Rahmen einer Fallstudie konnte mit Hilfe von Satellitendaten (TRMM 3B42) intensive Niederschlagsereignisse zu den Zeitpunkten der FS Meteor-Messungen nachgewiesen und damit die atypisch hohen Niederschlagsraten bestätigt werden.

Betrachtungen der Partikelgrößenverteilungen der einzelnen Klimazonen ergaben, dass in den kleinsten Größenklassen gefrorene Partikel deutlich häufiger aufgetreten sind als flüssige, bedingt durch die unterschiedlichen Sättigungsdampfdrücke über diesen Partikeln. Zwischen den Parti-

kelgrößenverteilungen der einzelnen Intensitätsklassen konnten bei Regen distinkte Unterschiede von bis zu zwei Größenklassen beschrieben werden. Diese Unterschiede traten jedoch nicht bei Schnee oder Mischphase auf. Unterschiedliche Verläufe der Partikelgrößenverteilungen beider Forschungsschiffe in den Tropen gaben Anlass, den Einfluss der Stichprobengröße auf die Verläufe zu untersuchen. Es ergab sich, dass der Verlauf der Partikelgrößenverteilung zwischen den Größenklassen von 0.5-2 mm nicht maßgeblich vom Umfang der Stichprobe abhängt.
Die Untersuchungen zeigten, dass durch die hochqualitativen optischen Disdrometermessungen im Rahmen von OceanRAIN eine große Diversität an Niederschlagsereignissen erfasst und hierüber detaillierte Einblicke in die Eigenschaften des gemessenen Niederschlags über dem Atlantik gewonnen werden.
In naher Zukunft wird über das OceanRAIN Instrumentarium die satellitengestützte Niederschlagserfassung kalibriert. Ebenfalls beinhaltet OceanRAIN eine große Bandbreite meteorologischer Parameter, deren Auswertung noch aussteht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Methode **5**

2.1 OceanRAIN in situ- und HOAPS Satelliten-Datensätze 5

2.1.1 OceanRAIN 5

2.1.2 HOAPS 9

2.2 Einteilung und Berechnung der OceanRAIN Niederschlagscharakteristika 9

2.3 Partikelgrößenverteilung des OceanRAIN Niederschlages 15

3 Ergebnisse **17**

3.1 Niederschlagsintensitäten über dem Atlantik 17

3.1.1 Phasenhistogramme und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen 17

3.1.2 Wahrscheinlichkeit von Niederschlagsereignissen 21

3.1.3 Niederschlagsmaxima, mittlere Raten und Akkumulationen 22

3.1.4 Fallstudie extremer Subtropenniederschläge 24

3.1.5 Verteilung von Niesel, stratiformen und konvektiven Niederschlägen . . . 26

3.1.6 Auswertung der kombinierten Datensätze der FS Polarstern und FS Meteor 30

3.2 Partikelgrößenverteilungen 32

3.2.1 PSD: Analyse der kombinierten Daten der FS Polarstern und FS Meteor . 32

3.2.2 Vergleich der Datensätze von FS Polarstern und FS Meteor 36

4 Schlussfolgerungen und Ausblick **39**

5 Literatur **43**

Danksagung 45

Eidesstattliche Erklärung 47

Abbildungsverzeichnis

1 Schematischer Aufbau des ODM470 6
2 Die kontinuierlichen Schiffsrouten der FS Polarstern und FS Meteor über den Atlantik. 8
3 Einteilung der Klimazonen nach Grundlage des HOAPS-Datensatzes. 11
4 Die Verteilung der FS Polarstern Niederschlagsraten in mm/h für Regen. 19
5 Die Verteilung der FS Polarstern Niederschlagsraten in mm/h für Schnee und Mischphase. 20
6 Die Verteilung der FS Meteor Niederschlagsraten in mm/h für Regen. 21
7 Relative Wahrscheinlichkeiten der erfassten Niederschlagsereignisse beider Forschungsschiffe. 22
8 Maximale und mittlere Rate in mm/h sowie die normierte Akkumulation des Niederschlages in mm getrennt nach FS Polarstern, FS Meteor und Klimazone. . 23
9 Die Daten des TRMM 3B42 für die zu validierenden Zeiträume 11.05.2014 - 15.05.2014 und 01.06.2014 - 02.06.2014. 25
10 FS Polarstern: Anteile der verschiedenen Niederschlagsintensitätsklassen und deren Anteile an der akkumulierten Menge an Niederschlag in Prozent. 28
11 FS Meteor: Anteile der verschiedenen Niederschlagsintensitätsklassen und deren Anteile an der akkumulierten Menge an Niederschlag in Prozent. 29
12 NPSD der Regenphase für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor. 34
13 NPSD für Schnee und Mischphase für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 der FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor. . . . 35
14 NPSD der FS Polarstern in den polaren Breiten der südlichen Hemisphäre für Schnee, differenziert nach australem Sommer und australem Winter. 36
15 Die NPSD für Regen beider Forschungsschiffe in den Tropen für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor. 37
16 Die NPSD für Regen beider Forschungsschiffe in den Tropen für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor mit eingeschränkter Stichprobengröße. 38

Tabellenverzeichnis

1 Einteilung der Klimazonen auf Grundlage der klimatologischen HOAPS-Niederschlagsdaten. 10
2 Anzahl der gemessenen Niederschlagsminuten beider Forschungsschiffe, abzüglich wahrer Null Messungen, separiert nach Klimazone und Phase. 12
3 Vergleich der Standardfehler für die FS Polarstern und die FS Meteor. 31
4 Vergleich der Standardfehler für den Datensatz, bestehend aus Messungen beider Forschungsschiffe. 31

Kapitel 1

Einleitung

Der globale Wasserkreislauf ist eine wesentliche Komponente des Klimasystems, da er Prozesse wie Verdunstung, Konvektion, Wolkenbildung und Niederschlag beinhaltet. Damit verbunden ist auch eine Umwandlung von Energie, welche wiederum eine wichtige Rolle im Energiekreislauf der Erde spielt. So geht ein Drittel der solaren Einstrahlung am Boden (80 W/m^2) in die Verdunstung von Wasser ein und liegt danach als latente Wärme vor (Trenberth et al., 2009). Ein weitreichendes Verständnis des Wasserkreislaufs ist essentiell für grundlegende Erkenntnisse über das Klimasystem der Erde (IPCC, 2007). Niederschlag ist neben der Verdunstung einer der fundamentalen Parameter im Wasserkreislauf und eine wichtige Austauschgröße zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre (Trenberth et al., 2009). Des Weiteren gehört Niederschlag zu den grundlegenden klimatologischen Variablen, um das Klima der Erde verstehen und es insbesondere modellieren zu können (Oki et al., 1999). ECHAM6 Modellierung (1997-1999) zeigt, dass ein großer Teil des Wassers in der Atmosphäre aus den Ozeanen stammt (483 km^3 pro Jahr) und mehr als 50% (448 km^3 pro Jahr) dieses Wassers in Form von Niederschlag dorthin zurück gelangt. Dies führt zu Veränderungen der Dichte, des Mischungsverhältnisses und des Salzgehaltes oberflächennaher Wasserschichten. Für die genaue Bestimmung der Frischwasserflüsse an den Ozeanoberflächen sind detaillierte Informationen zu den Niederschlägen über den Ozeanen unabdingbar (Romanova et al., 2010). Unter Frischwasserfluss versteht man die Differenz aus Niederschlag (P) und Verdunstung (E), worüber ermittelt werden kann, ob in einer Region mehr Niederschlag fällt als verdunstet oder umgekehrt. So ist beispielsweise nach Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data (HOAPS) (Andersson et al., 2011) der Frischwasserfluss über den Subtropen des Atlantiks im klimatologischen Mittel positiv (Verdunstung überwiegt Niederschlag, E-P > 0) und über den Tropen des Atlantiks negativ (Niederschlag überwiegt Verdunstung, E-P < 0).

Räumlich sowie zeitlich ist Niederschlag ein stark variierender Parameter. Dieser manifestiert sich als ein Ereignis von kurzer Dauer und starker sowie schnell wechselnder Intensität (Schauer) oder als ein Ereignis von langanhaltender Dauer und geringer Intensität (Nieselregen). Zudem tritt Niederschlag in verschiedenen Aggregatzuständen von flüssiger, fester oder Mischphase auf. Dies erschwert eine genaue in situ Erfassung und führt zu erheblichen Unsicherheiten in der Bestimmung von Niederschlag (Weller et al., 2008).

Für eine Erfassung von Niederschlagsereignissen mit hoher raumzeitlicher Abdeckung werden

Satelliten, u.a. ausgestattet mit passiven Mikrowellen-Sensoren (z.B. SSM/I[1]), verwendet. Dieser misst das Mikrowellenspektrum der von der Oberfläche und Atmosphäre der Erde emittierten Strahlung. Der Mikrowellenbereich wird genutzt, da die Atmosphäre dort für viele Frequenzen transparent ist. SSM/I misst die Strahlungsflussdichte in den Frequenzen 19.35, 22.235, 37.0 und 85.5 GHz. Die gemessene Strahlung (bzw. Strahlungsflussdichte) kann z.B. über das Rayleigh-Jeans-Gesetz in eine Helligkeitstemperatur umgerechnet werden. Die Helligkeitstemperatur erlaubt über Algorithmen Rückschlüsse auf u.a. die Rate des gefallenen Niederschlags. Allerdings variieren diese Algorithmen je nach zugrundeliegender Studie, wodurch bei Verwendung der gleichen Helligkeitstemperatur verschiedene Niederschlagsraten resultieren. Durch den Mangel an in situ Messungen, besonders über den Ozeanen, ist ein Validieren dieser Daten jedoch nur eingeschränkt möglich.
Zusätzlich liefern Reanalyse- sowie Modelldaten Informationen über das Auftreten und die Intensität von Niederschlag. Petty (1997), Andersson et al. (2011) und Stephens et al. (2012) zeigen jedoch, dass großen Abweichungen zwischen den einzelnen Datensätzen (Satellit, Reanalyse, Modell) bestehen. Zusätzlich stellt die Erfassung und Messung von Schnee durch Satellitenmessungen eine große Herausforderung dar (Levizzani et al., 2011).
Hochauflösende in situ Messungen sind daher notwendig um die Daten aus Satellitenmessungen bzw. Modellen zu validieren. Im Gegensatz zu in situ Niederschlagsmessungen über dem Land waren solche Messungen über den Ozeanen, welche rund 71% der Erdoberfläche bedecken, selten. Einen großen Beitrag lieferten die sogenannten Voluntary Observing Ships (VOS) (Kent et al., 2010) sowie Messbojen (Bourlès et al., 2008). VOS sind meist Handelsschiffe, die während ihrer Überfahrten meteorologische Daten manuell bestimmen und in Form von Berichten festhalten. Beide Methoden der Datenerhebung (VOS und Messbojen) haben Nachteile. Beispielsweise unterliegt die genaue Bestimmung der Niederschlagsrate aus den VOS-Berichten großen Unsicherheiten (Kent et al., 2010). Ebenfalls umschiffen VOS oftmals Gebiete mit schwerem Wetter (Sturmtiefs, Soares, 1990) und die Datenreihen konzentrieren sich überwiegend auf die Handelsrouten. Die Routen der Forschungsschiffe ergänzen die bestehende Datenbasis und liefern Messwerte aus bislang nicht durch in situ Niederschlagsmessungen abgedeckte Regionen. Messbojen hingegen liefern in situ Messungen über den Ozeanen, sind jedoch meist stationär.
Hinzu kommt, dass es lange Zeit problematisch war, Niederschlag auf Schiffen über dem offenen Ozean mit Regensammlern zu messen. Durch die an Bord häufig auftretenden hohen Windgeschwindigkeiten versagten die meisten herkömmlichen Instrumente zur Niederschlagsmessung, wie beispielsweise die Hellman-Kippwaage. Selbst eigens für diesen Zweck angefertigte Instrumente, wie der Schiffsregenmesser (Hasse et al., 1998), erfüllen ihre Aufgabe nur solange der Niederschlag in flüssiger Phase auftritt. Mit der Entwicklung optischer Messinstrumente (Disdrometer) zur Bestimmung des Niederschlags konnte diesem Problem besser begegnet werden. Diese Messsysteme basieren darauf, die Niederschlagsrate über die Anzahl und Größe der in einem Zeitintervall fallenden Tröpfchen, die sogenannte Partikelgrößenverteilung (PSD, engl. particle size distribution), zu bestimmen, worin ihr großer Vorteil gegenüber konventionellen Regensammlern besteht. Eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise des optischen Disdrometers erfolgt

[1] Special Sensor Microwave/Imager

in Unterkapitel 2.1.
Das im Jahre 2010 gegründete *Ocean Rainfall And Ice-phase precipitation measurement Network* (OceanRAIN) zielt darauf ab, qualitativ hochwertige Niederschlagsdaten über den Ozeanen zu liefern. Auf bislang zehn (ab Januar 2016 elf) Forschungsschiffen wurden optische Disdrometer des Typs ODM470 installiert (Klepp, 2015), fünf davon dauerhaft. Diese Schiffe durchqueren auf ihren Fahrten alle klimatologischen Regionen der Ozeane. Darunter befinden sich die arktischen und antarktischen Gewässer, die gemäßigten Breiten beider Hemisphären mit den Zugbahnen der Tiefdruckgebiete, die Subtropen sowie die Tropen mit der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ, engl. Inter-Tropical Convergence Zone).
Über die OceanRAIN Messungen wird die Niederschlagsintensität, differenziert nach flüssiger, fester und gemischter Phase, durch die gemessene PSD errechnet. Die PSD unterteilt die Niederschlagspartikel der Größe nach in 128 logarithmisch eingeteilte Klassen (bins). Die Partikelgröße ist bedeutend für das Verständnis mikrophysikalischer Entstehungsprozesse von Niederschlag, wie z.B. der Koaleszenz (dem Entstehen großer Tröpfchen aus kleineren), der Eisnukleation oder der Verdunstung fallender Tropfen (Klepp, 2015). Das genutzte Instrument ODM470 eignet sich durch seine Konstruktion gut für Niederschlagsmessungen an Bord von Schiffen. Beispielsweise sind die Messungen unabhängig vom Einfallwinkel der Tropfen und das System arbeitet autark. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise des ODM470 geben Clemens (2002) und Lempio (2006).
Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Analyse dieser in situ Niederschlagsmessungen, in Hinblick auf Phase, Intensitätsverteilungen und PSDs. Es werden ausschließlich Messungen über dem Atlantik betrachtet, erhoben von den Forschungsschiffen (FS) Polarstern und FS Meteor. Mit Hilfe der satellitengestützten Niederschlagsklimatologie des *Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data* (HOAPS) erfolgt eine Einteilung in verschiedene Klimazonen (Tropen, Subtropen, gemäßigte Breiten und polare Breiten), in Abhängigkeit des klimatologischen Jahresgangs (DJF, MAM, JJA, SON)[2]. Ebenfalls erfolgt eine Unterteilung der Niederschlagsereignisse nach ihrer Intensität in Niesel, stratiformen und konvektiven Niederschlag und deren Partikelgrößenspektren.
Ziel der Arbeit ist, den Niederschlag und die PSD des OceanRAIN Datensatzes unterteilt nach Region (Klimazonen des Atlantiks), dem klimatologischen Jahresgang (Quartale), Phase sowie Niederschlagsintensität (Niesel, stratiform, konvektiv) zu beschreiben und einer ersten Auswertung zu unterziehen.
Kapitel 2 umfasst eine Beschreibung der zugrundeliegenden Datensätze: OceanRAIN und HOAPS. Hierbei wird eine Einführung in die Grundlagen der Niederschlagserhebung (OceanRAIN: in situ Messungen mit optischen Disdrometern; HOAPS: satellitenbasiert) gegeben sowie die Inhalte dargestellt. Anschließend werden die angewandten Berechnungsgrundlagen und statischen Methoden vorgestellt. Daran schließt sich in Kapitel 3 die Darstellung der Niederschlagsergebnisse über den Atlantik an, die eine Interpretation wesentlicher Ergebnisse mit einschließt. Schwerpunkte liegen auf den Intensitäten des Niederschlags und der Partikelgrößenverteilung.
Die Arbeit schließt mit einer Schlussfolgerung und einem Ausblick (Kap. 4).

[2] Dezember-Februar, März-Mai, Juni-August, September-November

Kapitel 2

Methode

2.1 OceanRAIN in situ- und HOAPS Satelliten-Datensätze

Diese Arbeit basiert auf zwei Datensätzen: dem in situ *Ocean Rainfall And Ice-phase precipitation measurement Network* (OceanRAIN)-Datensatz, sowie dem satelliten-basierten *Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data* (HOAPS)-Datensatz. Der OceanRAIN Datensatz enthält 18 meteorologische Parameter, darunter Niederschlagsintensität, über den Ozeanen und bildet die statistische Datengrundlage dieser Arbeit. HOAPS basiert auf passiven Mikrowellen-Satellitenmessungen und liefert u.a. Informationen zu Wärmeflüssen, Verdunstung, Niederschlag und Frischwasserflüssen. HOAPS liefert die Klimatologie zur Einteilung der OceanRAIN Daten in Klimazonen.

2.1.1 OceanRAIN

Der OceanRAIN Datensatz ist weltweit der erste Datensatz, der langfristige Messungen von Niederschlagsdaten über den Ozeanen, die auf optischen Disdrometermessungen basieren, umfasst. Ende Oktober 2014 umfasste der Datensatz, der FS Polarstern und FS Meteor, 3,7 Millionen Messminuten. Diese Disdrometermessungen stellen eine erhebliche Verbesserung im Vergleich zu denen der Regensammler dar, da sie auf einem anderen Messprinzip aufbauen, der optischen Erfassung der Partikelgrößenverteilung (s.u.), und zwischen der Fest- und Flüssigphase des Niederschlages unterscheiden können (Lempio et al., 2007). Der Datensatz beinhaltet 26 Parameter, 18 davon mit meteorologischer Relevanz. Für die Auswertung stehen pro Schiff jeweils drei Datensätze zur Verfügung, von denen zwei Informationen über Niederschlagsintensitäten beinhalten. Während der eine die zeitlich kontinuierlichen Daten des gesamten Zeitraumes der Schiffsmessungen abdeckt, beinhaltet der andere ausschließlich diskontinuierliche Ereignisse. Der Dritte enthält Informationen über die Partikelgrößenverteilung.
Die Grundlage der Niederschlagsmessungen an Bord der Forschungsschiffe bildet das ODM470 (Abb. 1). Das Messvolumen (Abb. 1, Nr. 6), ist zylindrisch (120 mm Länge, 22 mm Durchmesser) und um die vertikale Achse frei beweglich (360°Rotation). Durch die zylindrische Form sind die Messungen unabhängig vom Einfallswinkel der Tropfen. Das System richtet sich mittels einer

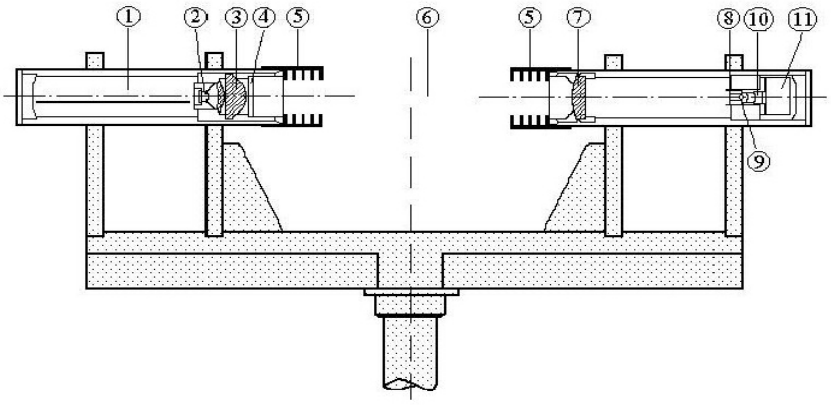

Abbildung 1: Schematischer Aufbau des ODM470: Elektronik (1), Infrarot-Diode (2), Linse (3), Fenster (4), Schutzkappe (5), Messvolumen (6), achromatische Sammellinse (7), optische Blende (8), Okular (9), Photodiode (10), Potentiometer (11).

Windfahne stets senkrecht zur relativen Windrichtung aus. Zudem arbeitet das System autark und bedarf nur eines geringen Wartungsaufwands. Das Messverfahren beruht auf der Abschattung einer Photodiode (Abb. 1, Nr. 10) durch Hydrometeore, die das Messvolumen (Abb. 1, Nr. 6) passieren. Auf der gegenüberliegenden Seite der Photodiode befindet sich eine Infrarot-Diode (Abb. 1, Nr. 2) als Sender. Solange sich kein Partikel innerhalb des Messvolumens befindet, liegt eine Referenzspannung von ca. 5 V an. Durch teilweise Abschattung der Photodiode fällt diese Spannung proportional zur Querschnittgröße des passierenden Teilchens ab. Über ein Intervall von 60 Sekunden integriert werden alle erfassten Hydrometeore der Querschnittsgröße nach in 128 logarithmisch verteilte Klassen (bins) eingeordnet. Die Klassengrößen des Datensatzes schließen ein Spektrum von 0,43 mm (bin 14) bis 22,29 mm (bin 128) mit ein. Die ersten 13 Tröpfchenklassen werden nicht registriert, da deren Erfassung mit Unsicherheiten verbunden sind (z.B. artifizielle Partikel hervorgerufen durch Schiffsvibrationen am Gerät). Über die Aufenthaltsdauer eines Teilchens innerhalb des Messvolumens werden Messfehler wie künstliches Blockieren der Diode oder das Herabrutschen eines Klumpen Schnees in das Volumen erkannt und aus dem Datensatz entfernt.
Die PSD [$1/m^3$] wird aus der Partikelanzahl pro bin, der relativen Windgeschwindigkeit, der Größe des Messvolumens und der über die Partikelgröße parametrisierten theoretischen Endfallgeschwindigkeit errechnet. Daraus resultiert in Minutenintervallen die jeweilige Anzahl an auftretenden Partikelgrößen pro bin im Volumen.
In die Berechnung der Niederschlagsrate gehen die PSD, theoretische Einfallgeschwindigkeit V_{Fall} (Formel 1) und Masse des Flüssigwasseräquivalents $M_{Partikel}$ (Formel 2) unter Berücksichtigung des errechneten Durchmessers D_p (Formel 3) des jeweiligen Partikels ein. Für flüssige Partikel wird

$$V_{Fall}(bin) = 9,65 - 10,3 * e^{1,2\frac{D_p(bin)*10}{2}} \quad (1)$$

$$M_{Partikel}(bin) = \frac{4}{3} * \pi * 1000 * \left(\frac{D_p(bin)}{200}\right)^3 \quad (2)$$

$$\mathrm{D_p}(\mathrm{bin}) = \frac{e^{\frac{\mathrm{bin}}{94}\ln 10} - 1 + e^{\frac{\mathrm{bin}+1}{94}\ln 10} - 1}{2} \tag{3}$$

genutzt. Allerdings ist zu beachten, dass sich flüssige und feste Partikel erheblich in ihrer Dichte unterscheiden. Deshalb werden für beide Aggregatzustände unterschiedliche Formeln bezüglich der Partikelmasse (Flüssigwasseräquivalent) sowie der theoretischen Endfallgeschwindigkeit, abhängig von der Querschnittgröße, genutzt. Für feste Partikel (Schnee und Mischphase) gilt

$$\mathrm{V_{Fall}}(\mathrm{bin}) = 7,33 * (\mathrm{D_p}(\mathrm{bin}))^{0,78} \tag{4}$$

$$\mathrm{M_{Partikel}}(\mathrm{bin}) = 0,0000107 * (\mathrm{D_p}(\mathrm{bin}))^{3,1} \tag{5}$$

Die Bestimmung der Phase verläuft manuell und bezieht die Parameter Lufttemperatur und SYNOP-Schlüssel mit ein (Klepp, 2015). Abschließend werden die Niederschlagsraten auf eine Stunde normiert und weisen somit die Einheit [mm/h] auf.
Niederschlagsereignisse werden insgesamt in sechs Klassen unterteilt: 0. Regen, 1. Schnee, 2. Mischphase, 3. wahre Null[1], 4. Fehlmessung[2] 5. Hafenzeit[3]. Pro Minute wird ein Messwert generiert, der einer der ersten vier Klassen zugeordnet wird. Fehlmessungen werden mit Hilfe einer Qualitätskontrolle deklariert, die extreme Messwerte auf ihre Plausibilität hin überprüft (Klepp, 2015).
Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Messungen erstrecken sich über einen Zeitraum von vier Jahren, von Juni 2010 bis Oktober 2014, für die FS Polarstern und einen Zeitraum von etwa einem Jahr, von März 2014 bis Februar 2015, für die FS Meteor. Der genutzte kontinuierliche Datensatz der FS Polarstern umfasst 2.050.560 und der diskontinuierliche 266.860 Messwerte. Bei der FS Meteor sind es 658.080 kontinuierliche Daten und 16.488 diskontinuierliche Messwerte. Die Daten der FS Meteor suggerieren damit eine geringere statistische Basis als die der FS Polarstern, jedoch wird dies durch die regionale Verteilung der Daten teilweise kompensiert (siehe Kapitel 3). Messminuten mit Fehlfunktionen des Disdrometers sowie Hafenzeiten wurden aus den diskontinuierlichen Datensätzen entfernt. Die Hafenzeiten beinhalten durch externe Einflüsse, wie Wartungen, ein erhöhtes Risiko von fehlerhaften Messungen.
Der kontinuierliche Datensatz wird für die Darstellung der Schiffsrouten verwendet, der diskontinuierliche für die statistischen Berechnungen (mit Ausnahme der Histogramme und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, siehe Kap. 2.2 und Kap. 3.1). Das gesamte, von beiden Schiffen befahrene, Gebiet über dem Atlantik ist in Abb. 2 dargestellt. Erwartungsgemäß wird nicht der gesamte Atlantik, sondern nur ein Bruchteil durch die Schiffsspuren abgedeckt. Hinzu kommt die geringe Niederschlagswahrscheinlichkeit in den vorliegenden Daten (exklusive Fehlmessungen und Hafenzeiten) von 8,76%. Aus Abb. 2 geht hervor, dass sich die Messungen der FS Polarstern

[1] Ein Ereignis, bei dem es nachweislich nicht geregnet hat.
[2] Gerät außer Betrieb oder fehlerhafte Messung.
[3] Keine Messungen während Hafenzeiten.

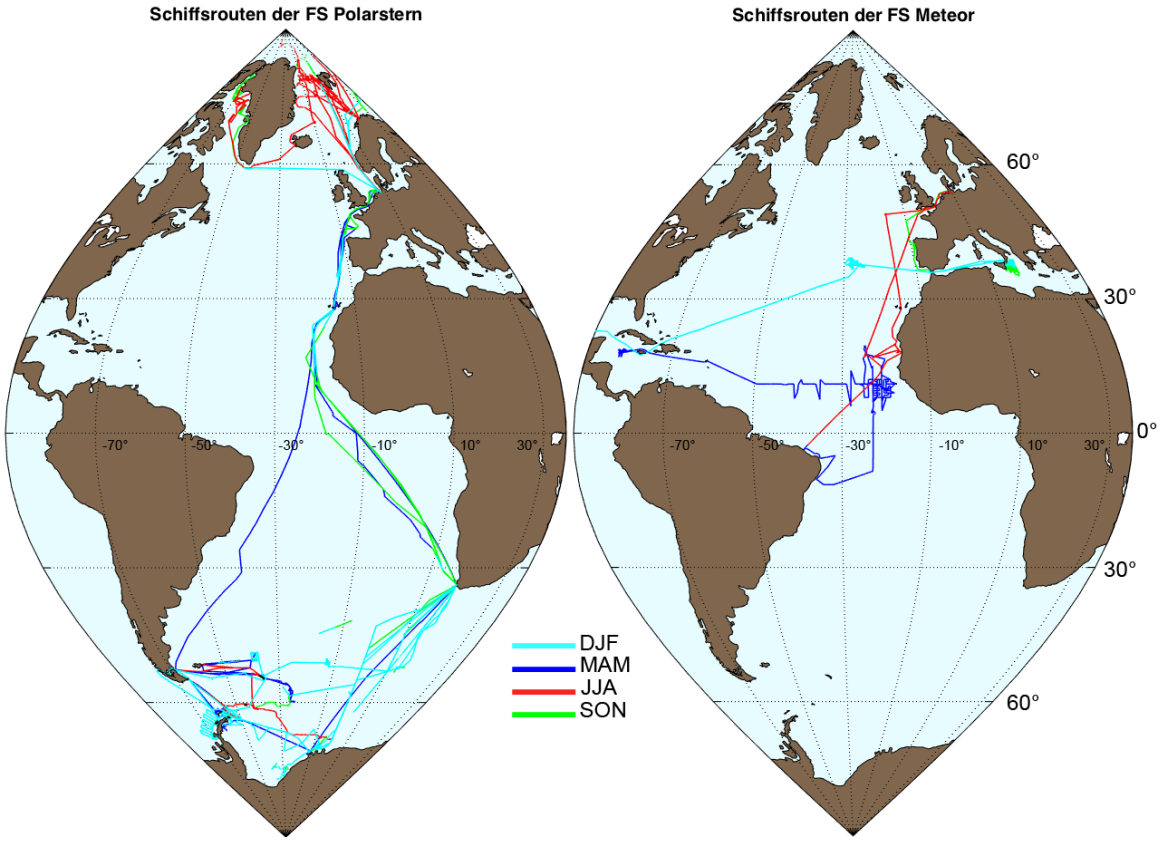

Abbildung 2: Die kontinuierlichen Schiffsrouten der FS Polarstern (Juni 2010 bis Oktober 2014) und FS Meteor (März 2014 bis Februar 2015) über dem Atlantik abzüglich Klasse 4 und 5. Die unterschiedlichen Quartale des Jahres werden über die Linienfarben kenntlich gemacht.

auf die mittleren und polaren Breiten beider Hemisphären in den jeweiligen Sommermonaten konzentrieren (auf der Südhalbkugel auch in den Wintermonaten). Infolgedessen wurden die Tropen und Subtropen meist in den dazwischen liegenden Jahreszeiten auf direktem Wege durchquert. Bei der FS Meteor konzentrieren sich die Messungen auf die Tropen, Subtropen und mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre. In dieser Arbeit wurden die Daten aus den Eismeeren dem Atlantik zugeordnet. Die im Mittelmeer erfassten Daten (FS Meteor) wurden eliminiert. Des Weiteren fallen isolierte oder abrupt endende Schiffsspuren auf (z.B. Schiffsroute der FS Polarstern während SON/DJF in den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre). Die isolierten Spuren resultieren aus Fehlmessungen. Die abrupt endenden Spuren besitzen keine eindeutig erkennbare Ursache in den Daten und könnten auf zeitweise Ausfälle der Messungen hinweisen. So weist beispielsweise die Route der FS Polarstern im DJF von ca. 54°S, 9°E bis 63°S, 4°E wahre Null- (Klasse 3) und Schneeereignisse (Klasse 2) mit unauffälligen Raten von 0 bis 3,63 mm/h auf, ehe sie abrupt endet. Pro Schiff steht ein weiterer Datensatz zur Verfügung, der neben Informationen über Ort, Zeit und Art des Niederschlags zusätzlich die PSD enthält. Dieser PSD-Datensatz ist diskontinuierlich, enthält also ausschließlich Niederschlagsereignisse (Kapitel 2.3).
Detailliertere Informationen zu OceanRAIN und den Datensätzen sind Klepp (2015) zu entnehmen.

2.1.2 HOAPS

Der satellitenbasierte Datensatz HOAPS (Andersson et al., 2011) beinhaltet Informationen der globalen Wasserkreislaufparameter über den eisfreien Ozeanen, darunter Wärmeflüsse, Verdunstung und Niederschlag (ohne Trennung der Phasen). Die Daten stammen von Satelliten mit passiven Mikrowellensensoren (DMSP SSMI). Er wird genutzt um die OceanRAIN Niederschlagsdaten in Klimazonen einzuteilen. Der Datensatz liefert eine kontinuierliche Zeitreihe von 1988 bis 2012. Insgesamt liegen drei Datensätze in der genutzten Version 3.2 (Fennig et al., 2012) vor: HOAPS-S, HOAPS-G und HOAPS-C. HOAPS-S beinhaltet scan-basierte Pixeldaten in nativer Auflösung von 50 km, gemessen auf der jeweiligen Flugbahn der Satelliten und bildet den gemeinsamen Datenpool der anderen beiden Datensätze. HOAPS-G und HOAPS-C sind gegitterte 0,5°Daten, wobei HOAPS-G die Monatsmittel und HOAPS-C 6h-Werte beinhaltet. Die Bestimmung des Niederschlages erfolgt mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes, welches darauf trainiert wurde, die gemessenen SSMI-Helligkeitstemperaturen entsprechenden Niederschlagswerten zuzuordnen. Die Trainingsdaten dieses Netzwerkes stammen vom European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) und decken eine Vielzahl von Niederschlagsereignissen inklusive Schnee ab. Eine detailliertere Beschreibung gibt Andersson et al. (2010) sowie die HOAPS-Internetseite (http://www.hoaps.org/).

2.2 Einteilung und Berechnung der OceanRAIN Niederschlagscharakteristika

Das Ziel dieser Arbeit ist die statistische Analyse des OceanRAIN Niederschlags. Da die Niederschlagshäufigkeiten und -phasen je nach Klimazone sehr unterschiedlich und die Zonen unkorreliert sind, werden diese getrennt voneinander betrachtet. Des Weiteren wird eine Separierung der Niederschlagsintensitäten in Niesel, stratiformen und konvektiven Niederschlag durchgeführt, um die unterschiedlichen Charakteristika der einzelnen Klimazonen zu untersuchen.

Für die raumzeitliche Einteilung der Klimazonen des OceanRAIN Datensatzes wurden die Satellitendaten der HOAPS Klimatologie herangezogen. Die ausgewählten Zeiträume für den klimatologischen Jahresgang (Quartale) von 1988-2008 sind in Tabelle 1 aufgetragen. Die räumliche Einteilung untergliedert die beiden Hemisphären des Atlantiks in Tropen, Subtropen, gemäßigte Breiten und polare Breiten. Aufgrund der saisonalen Variabilität der Sonneneinstrahlung, der Kontinent-/Ozeanverteilung und deren Einfluss auf den Wasserkreislauf (Trenberth et al., 2009) besitzen die klimatologischen Niederschläge in der ITCZ sowie den mittleren Breiten keine zeitlich konstanten geographischen Grenzen. Unter Zuhilfenahme der HOAPS-3.2 Climatological Means 1988-2008 werden die jeweiligen Grenzen zwischen den Klimazonen bestimmt (Abb. 3). Dabei dienen die visuellen Gradienten der klimatologischen HOAPS-Niederschlagsdaten zur Identifikation der Grenzen zwischen den Klimazonen. Die inneren Tropen umfassen somit nur die Regionen, in denen sich nach den klimatologischen HOAPS-Niederschlagsdaten die ITCZ befindet (Niederschlagsrate $\geq$ 5 mm/d). Die Subtropen beider Hemisphären bilden die Region zwischen den Tropen und den jeweiligen gemäßigten

Breiten. Diese beiden Klimazonen sind in Anlehnung an die HOAPS-Klimatologie (Abb. 3) klar definiert. Die gemäßigten Breiten der nördlichen und südlichen Hemisphäre decken die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete beider Hemisphären nach HOAPS ab (Niederschlagsrate $\geq$ 3-4 mm/d). Polwärtige Bereiche ab einer Breite von 60° N / 60° S definieren die polaren Breiten.

Tabelle 1: Einteilung der Klimazonen auf Grundlage der klimatologischen HOAPS-Niederschlagsdaten. Die Einteilung erfolgt nach Quartalen in Tropen, Subtropen, gemäßigte Breiten und polare Breiten (nicht aufgeführt, da stets polwärts von 60°N/S).

Quartal	Tropen	Subtropen	gemäßigte Breiten
Dezember bis Februar	09°N - 09°S	NH: 09°N - 30°N SH: 09°S - 17°S	NH: 30°N - 60°N SH: 17°S - 60°S
März bis Mai	10°N - 05°S	NH: 10°N - 28°N SH: 05°S - 23°S	NH: 28°N - 60°N SH: 23°S - 60°S
Juni bis August	15°N - 03°N	NH: 15°N - 30°N SH: 03°N - 28°S	NH: 30°N - 60°N SH: 28°S - 60°S
September bis Oktober	13°N - 01°N	NH: 13°N - 30°N SH: 01°N - 16°S	NH: 30°N - 60°N SH: 16°S - 60°S

Diese Einteilung nach Klimazonen wird für die kontinuierlichen und diskontinuierlichen Datensätze beider Schiffe (FS Polarstern und FS Meteor) angewandt. Für jede Klimazone und die zugrundeliegenden Daten (kontinuierliche bzw. diskontinuierliche) wird ein Datensatz pro Quartal gebildet. Um für jede Klimazone einen möglichst vollständigen Datensatz zu erhalten, werden pro Schiff die einzelnen Datensätze der Quartale einer Klimazone, jeweils getrennt für die kontinuierlichen und diskontinuierlichen Daten, zusammengefasst.

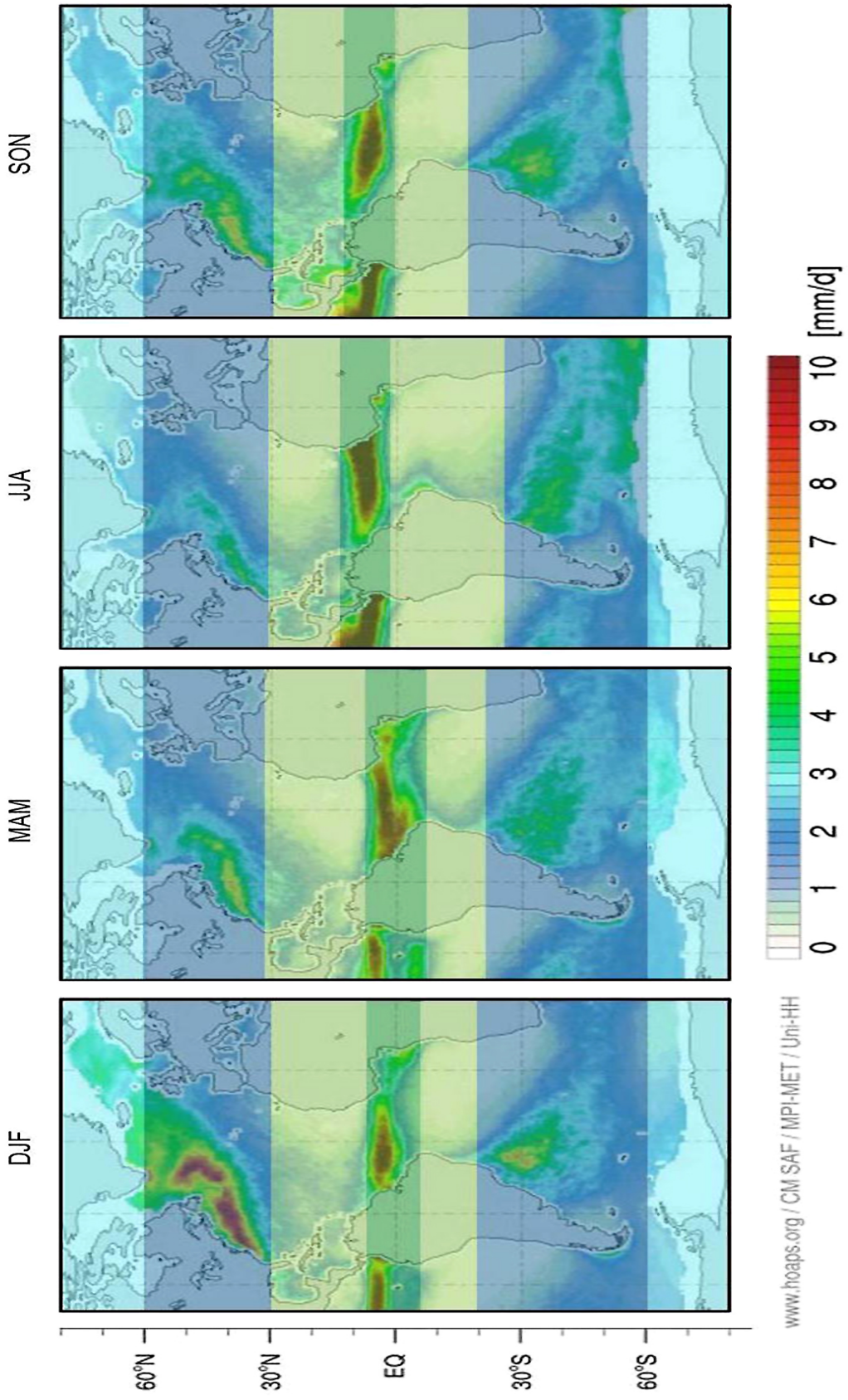

Abbildung 3: Einteilung der Klimazonen basierend auf dem klimatologischen (1988-2008) HOAPS 3.2 Niederschlag [mm/h]. Farbliche Codierung der Klimazonen: dunkelgrüne Schattierung: Tropen, hellgrüne Schattierung: Subtropen, dunkelblaue Schattierung: mittlere Breiten, hellblaue Schattierung: polare Breiten. Nach Andersson et al. (2011) und http://www.hoaps.org/ (Stand 05.08.2015).

Anschließend erfolgt eine Unterteilung nach Regen-, Schnee- und Mischphasenereignissen sowie wahre Null Messungen (letztere nur für die Histogramme, Kap. 3.1.1), gemäß der Definition der OceanRAIN Daten (vgl. Kapitel 2.1). Somit ist es möglich, statistische Aussagen differenziert nach Klimazone, Quartal und Phase zu treffen. Da die Jahreszeiten bereits bei der Einteilung der jeweiligen, auf HOAPS basierenden, Klimazone berücksichtigt wurden (s.o. und Abb. 3), wird in den folgenden Schritten nach Klimazone und Phase separiert. Tabelle 2 zeigt die Niederschlagsphasen, welche von der FS Polarstern und der FS Meteor in den verschiedenen Klimazonen des Atlantiks gemessen wurden. Bei der FS Polarstern ist das ungleiche Sampling der gemessenen Niederschlagsminuten zwischen den hohen und niedrigen Breiten gut zu erkennen. Der Unterschied beträgt bis zu zwei Größenordnungen (z.B. 113 Regenminuten in den Subtropen der nördlichen Hemisphäre gegenüber 51.584 Regenminuten in den gemäßigten Breiten der südlichen Hemisphäre, vergleiche Tab. 2). Ebenfalls zeigt sich bei dem Vergleich zwischen FS Polarstern und FS Meteor, dass die FS Meteor trotz der kürzeren Messzeit (etwa 1 Jahr) in den Tropen und Subtropen beider Hemisphären mehr Niederschlagsminuten als die FS Polarstern (Messzeitraum etwa 4 Jahre) gemessen hat.

Tabelle 2: Anzahl der gemessenen Niederschlagsminuten beider Forschungsschiffe, abzüglich wahrer Null Messungen, separiert nach Klimazone und Phase. Die Klimazonen werden beginnend von der nördlichen Hemisphäre (oben) vertikal aufgelistet. Da die Tropen eine zusammenhängende Region in der Nähe des Äquators beschreiben wurde dort auf eine Trennung nach Hemisphäre verzichtet. PB: polare Breiten, MB: mittlere Breiten, ST: Subtropen, TR: Tropen.

Klimazone	FS Polarstern	FS Meteor
PB	Regen: 36.024 Schnee: 39.421 Misch: 12.754	-
MB	Regen: 9.460	Regen: 4.362
ST	Regen: 113	Regen: 5.106
TR	Regen: 1.377	Regen: 2.717
ST	Regen: 1.123	Regen: 1.465
MB	Regen: 51.584 Schnee: 12.541 Misch: 7.838	-
PB	Regen: 9.252 Schnee: 73.663 Misch: 11.645	-
$\sum$	266.795	16.488

Diese Daten werden statistisch ausgewertet. Dazu gehört die Bestimmung des Mittelwertes, der Standardabweichung, des Standardfehlers, der Maxima sowie der normierten Akkumulation von Niederschlag nach den Formeln (6)-(9). Dabei ist $\bar{X}$ der Mittelwert (6), n die Anzahl an Messwerten, x_i eine Stichprobe mit $i \, \varepsilon\{1, ..., n\}$, S die Standardabweichung (7), S_n der Standardfehler

(8) und acc_{norm} die normierte Akkumulation (9).

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{6}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{7}$$

$$S_n = \frac{S}{\sqrt{n}} \tag{8}$$

$$acc_{norm} = (\frac{1}{60}\sum_{i=1}^{n} x_i) * \frac{1}{T_{zone}} \tag{9}$$

Bei der normierten Akkumulation wird durch die Gesamtzeit T_{zone} dividiert, in der sich das Schiff in der jeweiligen Klimazone befand. Dadurch werden die einzelnen Zonen, welche je nach Schiffsspur unterschiedliche Stichprobengrößen besitzen, vergleichbar. Der Vorfaktor ist notwendig für die Umrechnung von mm/h auf mm. Weiterführend werden Histogramme der einzelnen Phasen (Phasenhistogramme) und Klimazonen, bezogen auf die gemessene Niederschlagsintensität, erstellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) gemäß (10).

$$y = f(x|a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{\frac{-x}{b}} \tag{10}$$

Die Verteilung von Niederschlagsintensitäten folgt nicht der Normal-, sondern einer schiefen Verteilung und besitzt ihr Maximum nahe Null[4]. In dieser Arbeit wird eine Gammaverteilung der Niederschlagsdaten angenommen. Diese Annahme wird mittels der nach Formel 10 angepassten Gamma-PDF überprüft. Γ ist die Gamma-Funktion, a der sogenannte shape- und b der scale-Parameter (Yevjevich, 1972). Diese beiden Parameter werden mittels eines Algorithmus der Momentenmethode bestimmt. Hierbei werden die theoretischen Momente der Verteilung (11) und (12),

$$\bar{X}_{PDF} = a * b \tag{11}$$

$$S^2_{PDF} = a * b^2 \tag{12}$$

resultierend aus den unbekannten Parametern (in diesem Fall a und b), mit den empirischen Momenten gleichgesetzt. Als empirische Momente dienen hier Mittelwert $\bar{X}$ (13) und Varianz S^2

[4] mit Berücksichtigung wahrer Null Ereignissen auf der Null.

(14) gleichverteilter Zufallsvariablen. Anschließend wird das resultierende Gleichungssystem

$$\bar{X} = a * b \tag{13}$$

$$S^2 = \sqrt{a * b^2} \tag{14}$$

nach den Parametern a und b aufgelöst und man erhält die Schätzfunktionen $\hat{a}$ (15) und $\hat{b}$ (16),

$$\hat{a} = \frac{\bar{X}^2}{S^2} \tag{15}$$

$$\hat{b} = \frac{\bar{X}}{S^2} \tag{16}$$

so dass die an die Daten angepasste Gammafunktion berechnet werden kann.
Des Weiteren werden die in Tabelle 2 aufgelisteten Niederschlagsereignisse nach der Definition von Houze (1993) bezüglich ihrer Intensität in drei verschiedene Klassen separiert:

1. Niesel 0 - 0,5 mm/h
2. Stratiformer Niederschlag 0,5 - 5 mm/h
3. Konvektiver Niederschlag $>$ 5 mm/h

Damit ist es möglich, den jeweiligen Anteil dieser Niederschlagsklassen in Hinblick auf die gemessenen Ereignisse zu bestimmen. Die Kriterien der von Houze (1993) genutzten Unterteilung leiten sich aus charakteristischen Radarechos ab (z.B. Brightband für stratiformen Niederschlag, Houze 1997). Da diese Brightbandinformationen für die Datenreihen des OceanRAIN Datensatzes nicht zur Verfügung stehen, wird die Niederschlagsintensität als Unterscheidungskriterium genutzt.
Die insgesamt akkumulierte Niederschlagsmenge der verwendeten OceanRAIN Daten beträgt für die FS Polarstern, über einen Messzeitraum von etwa vier Jahren, 1524 mm und für die FS Meteor, über einen Messzeitraum von etwa einem Jahr, 699 mm.

2.3 Partikelgrößenverteilung des OceanRAIN Niederschlages

Neben den Daten der Niederschlagsintensität werden ebenfalls die entsprechenden PSD-Daten des OceanRAIN Datensatz analysiert. Der PSD-Datensatz enthält Informationen über Ort, Zeit, Niederschlagsphase sowie -intensität und die Anzahl an Partikeln, die innerhalb des Messintervalls von 60 Sekunden das Messvolumen passiert haben. Diese Partikel sind nach zugehöriger Größenklasse in 128 bins eingeteilt. Für die Analyse der PSD werden die Daten, in Anlehnung an die Berechnungen der Niederschlagsintensitäten, mittels den in Kapitel 2.2 genannten drei (bzw. vier) Parametern voneinander unterschieden: der Klimazone (damit auch der Quartale) nach HOAPS, der Phase und der Intensität nach OceanRAIN.
Die PSD wird über die sogenannte number concentration $\mathrm{num_c}$ mit der nicht konstanten Intervallbreite der 128 bins normiert. Zur Berechnung der $\mathrm{num_c}$ wird die Summe jedes bins durch die Dauer aller Niederschlagsereignisse in einer Zone T_{zone} in Minuten dividiert (17). Dies verhindert das Überschätzen der Häufigkeit von Tropfen großer Klassen, da diese im Gegensatz zu den kleineren bins selten belegt sind (Klepp, 2015).

$$\mathrm{num_c(bin)} = \sum_{i=14}^{128} \mathrm{bin_i} * \frac{1}{T_{zone}} \tag{17}$$

Die Variable i steht für die verschiedenen Größenklassen und deckt somit ein Spektrum von 14 bis 128 ab. Die ersten 13 Größenklassen wurden nicht verwendet siehe Kap. 2.1. Die so erhaltene normierte $\mathrm{num_c}$ wird im Folgenden NPSD genannt.
Für die PSD wurde ein vorläufiger Datensatz verwendet, der für den PSD-Datensatz der FS Polarstern etwa 50.000 Werten (25 %) im Vergleich zu dem der Intensitäten aufweist.

Kapitel 3

Ergebnisse

Zunächst werden in Kapitel 3.1 die Ergebnisse zur Niederschlagsintensität über dem Atlantik vorgestellt und in Kapitel 3.2 die der PSDs. Hierfür wurden ausschließlich die diskontinuierlichen Datensätze beider Schiffe verwendet. Einzig die Phasenhistogramme und zugehörigen PDFs beinhalten die kontinuierlichen Daten, abzüglich der Fehl- und Hafenzeiten. Erst werden die Daten beider Forschungsschiffe getrennt voneinander betrachtet, dann miteinander verglichen (3.1.1 bis 3.1.5) und abschließend noch einmal als kombinierter Datensatz gemeinsam analysiert (3.1.6).

3.1 Niederschlagsintensitäten über dem Atlantik

3.1.1 Phasenhistogramme und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Die Niederschlagsraten-Histogramme getrennt nach Phasen mit ihren dazugehörigen Gamma-PDFs geben einen Überblick über die Verteilung der Niederschlagsraten und -phasen (für Regen FS Polarstern Abb. 4, Schnee und Mischphase FS Polarstern Abb. 5, für Regen FS Meteor Abb.6). Es wird überprüft, ob die Messdaten einer Gamma-Verteilung folgen.
Die Datengrundlage der Histogramme bilden jeweils die Niederschlagsmessungen einer Phase (Regen, Schnee, Mischphase) und Klimazone einschließlich aller wahren Null Messungen in dieser Klimazone. Für die Darstellung der auf 1 normierten Histogramme wurden doppelt logarithmische Achsen gewählt sowie eine logarithmische Klasseneinteilung. Um die sich ändernde Balkenweite zu berücksichtigen, wurde anschließend mit ihr normiert. Dadurch lassen sich Klimazonen mit stark unterschiedlicher Intensität (z.B. Subtropen und Tropen) und stark unterschiedlicher Anzahl an erfassten Niederschlagsminuten miteinander vergleichen. Die X-Achsen geben stets die Niederschlagsrate in mm/h und die Y-Achsen die Wahrscheinlichkeitsdichte zwischen 0 und 1 an. Da bei einer logarithmischen Darstellung die Raten der wahren Null Ereignisse (0 mm/h) nicht dargestellt werden können, wurden diese der Rate 0.01 mm/h zugeordnet. Die kleinste, stets erkennbare Lücke zu Beginn jedes Histogramms ist auf die Messgenauigkeit des ODM470, die diese geringen Raten nicht auflösen kann, zurückzuführen.
Aus den jeweiligen Abbildungen geht hervor, dass die maximalen Raten von beiden Schiffen jeweils in den Tropen gemessen wurden (Abb. 4 und Abb. 6). Ferner haben die maximalen Raten für Schnee und Mischphase bei der FS Polarstern in allen entsprechenden Klimazonen

eine vergleichbare Ausprägung, mit Ausnahme der Mischphase in den polaren Breiten der nördlichen Hemisphäre (Abb. 5, siehe Kapitel 3.1.3). Weiterhin geht aus den Histogrammen für die Messreihen der FS Polarstern (Abb. 4 und Abb. 5) eine sehr gute Übereinstimmung der Niederschlagsintensitäten mit der entsprechenden Gamma-PDF (blaue Linie) für alle Phasen hervor. Alle Histogramme besitzen ihr Maximum bei 0.01 mm/h und fallen annähernd stetig ab (einzelne Balken weichen geringfügig von diesem Verlauf ab z.B. bei den Subtropen der südlichen Hemisphäre Abb. 4). Die Abweichung des jeweils ersten Balkens von der angepassten PDF lässt sich über die oben genannte Zuordnung der wahren Null Ereignisse zu der Rate 0.01 mm/h erklären, welche bei der Anpassungen der PDF noch auf 0 mm/h gesetzt waren.
Ebenso folgen die aus den OceanRAIN Daten erhaltenen Histogramme der FS Meteor dem Verlauf der Gamma-PDFs (Abb. 6). Auch hier besitzen die Histogramme in den vier untersuchten Klimazonen ihr Maximum bei der Rate 0.01 mm/h und fallen danach nahezu stetig ab.
Somit kann eine Gammaverteilung für die von der FS Polarstern und FS Meteor erfassten Niederschlagsraten der jeweiligen Zeiträume bei allen Phasen gezeigt werden.

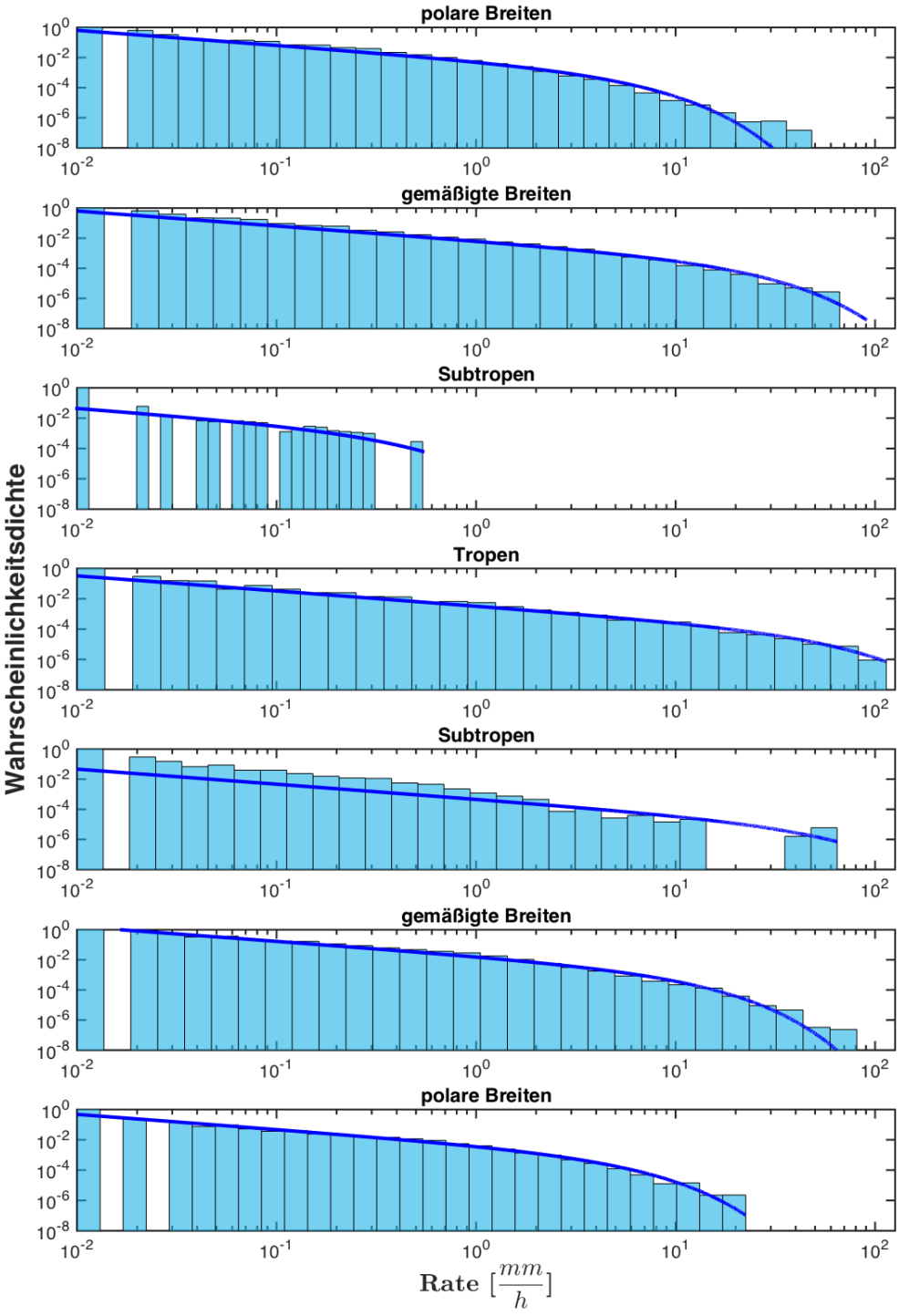

Abbildung 4: Die Verteilung der FS Polarstern Niederschlagsraten in mm/h für Regen für alle Klimazonen von der nördlichen Hemisphäre (oben) bis zur südlichen Hemisphäre (unten). Die blaue Linie beschreibt jeweils die zugehörige PDF der angepassten Gamma-Verteilung. Auf der X-Achse sind die Raten in mm/h und auf der Y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte von 0 bis 1 aufgetragen (doppelt logarithmische Darstellung).

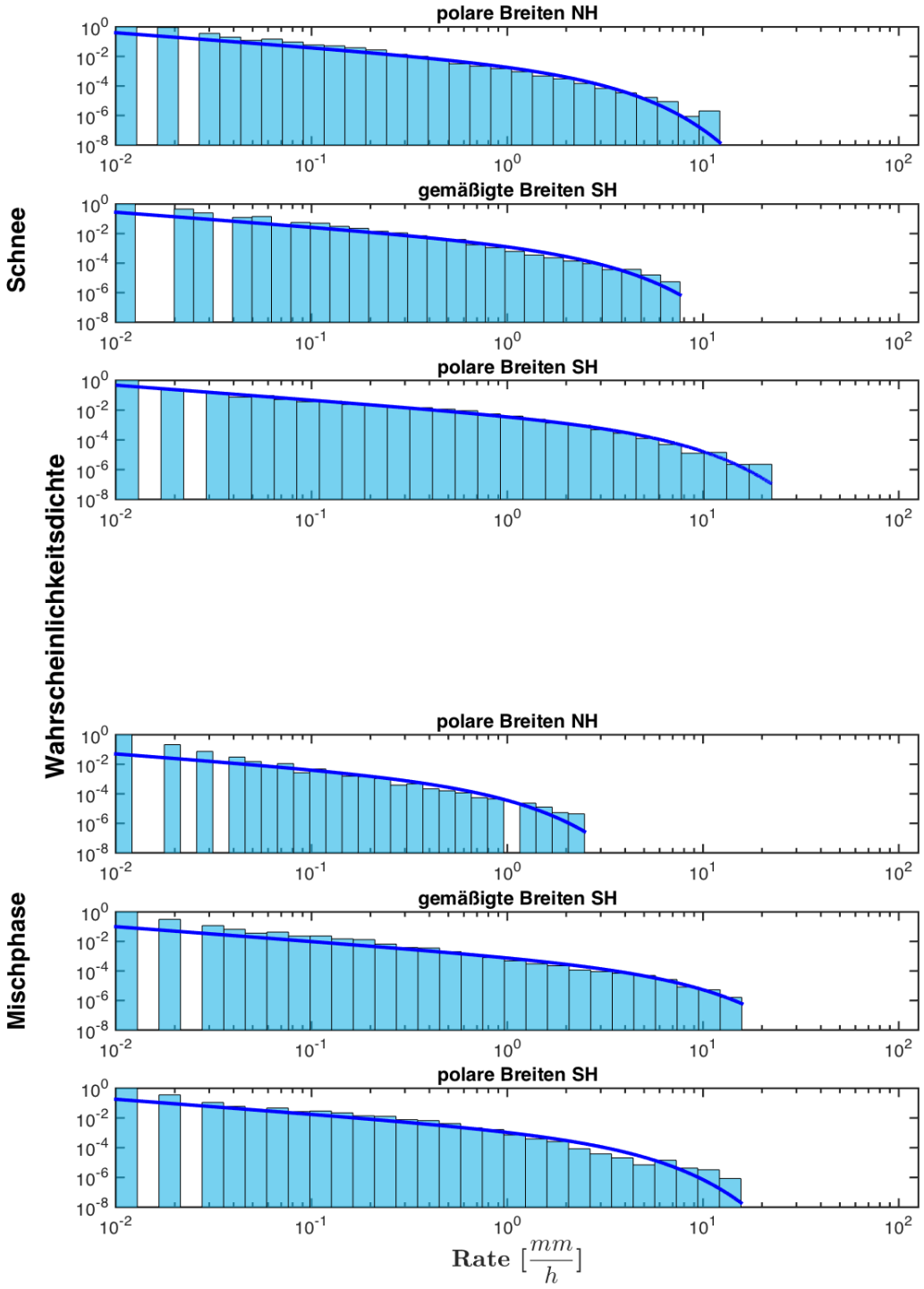

Abbildung 5: Die Verteilung der FS Polarstern Niederschlagsraten in mm/h für Schnee (oben) und Mischphase (unten) jeweils für die relevanten Klimazonen von der nördlichen Hemisphäre (oben) bis zur südlichen Hemisphäre (unten). Die blaue Linie beschreibt jeweils die zugehörige PDF der angepassten Gamma-Verteilung. Auf der X-Achse sind die Raten in mm/h und auf der Y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte von 0 bis 1 aufgetragen (doppelt logarithmische Darstellung).

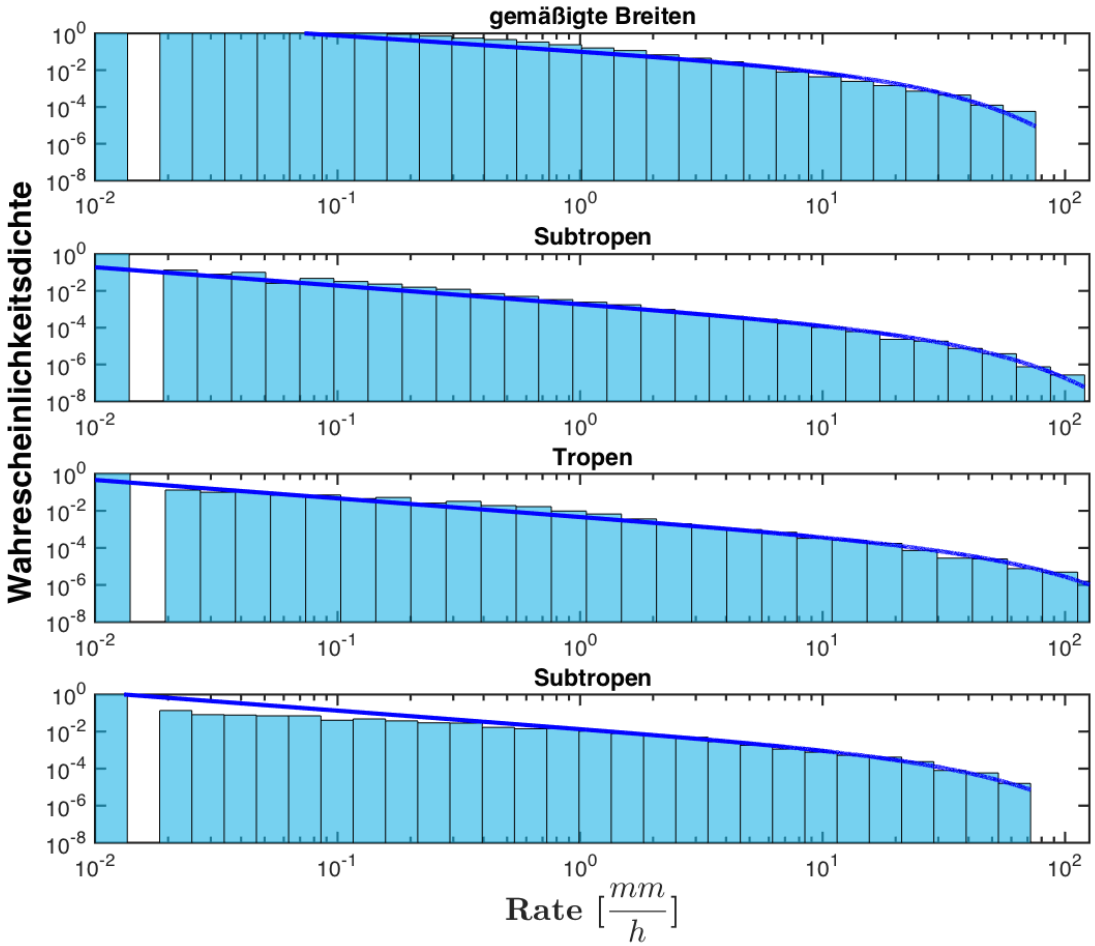

Abbildung 6: Die Verteilung der FS Meteor Niederschlagsraten in mm/h für Regen für relevanten Klimazonen von der nördlichen Hemisphäre (oben) bis zur südlichen Hemisphäre (unten). Die blaue Linie beschreibt jeweils die zugehörige PDF der angepassten Gamma-Verteilung. Auf der X-Achse sind die Raten in mm/h und auf der Y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte von 0 bis 1 aufgetragen (doppelt logarithmische Darstellung).

3.1.2 Wahrscheinlichkeit von Niederschlagsereignissen

Aus den Daten wurden zudem die relativen Wahrscheinlichkeiten der Niederschlagsereignisse aller Klimazonen bestimmt (Abb. 7). Auf der X-Achse sind die jeweiligen Klimazonen, von links beginnend, mit den polaren Breiten der nördlichen bis zu den polaren Breiten der südlichen Hemisphäre und auf der Y-Achse die Niederschlagswahrscheinlichkeiten aufgetragen. Die unterschiedlichen Farben beschreiben die gemessenen Niederschlagsphasen der Forschungsschiffe: FS Polarstern: blau für Regen, türkis für Schnee und grün für Mischphase, FS Meteor: gelb für Regen. In die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten gehen neben den Regen., Schnee- und Mischphasenereignissen ebenfalls die wahren Null Messungen mit ein.
Die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Niederschlagsereignisses in den vorliegenden Datensätzen beider Forschungsschiffe beträgt 8,76%. Die einzelnen Wahrscheinlichkeiten liegen meist unter 8%: Ausnahmen bilden Regen in den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre (14%) und Schnee in den polaren Breiten der südlichen Hemisphäre (22%), zurückzuführen auf die

Messungen im Polarwinter. Bei den Wahrscheinlichkeiten der FS Polarstern für Regen fällt ein Unterschied zwischen den mittleren Breiten beider Hemisphären und den Tropen auf. In den mittleren Breiten liegen die Werte (NH: 8%, SH: 15%) deutlich über denen der Tropen (4%). Wie in Kapitel 3.1.1 gezeigt, folgen die normierten Histogramme dieser Zonen trotz sehr unterschiedlicher Stichprobengrößen (gemäßigte Breiten NH: 122.038 Messwerte davon 9.460 Regenereignisse, Tropen: 35.535 Messwerte davon 1.377 Regenereignisse, gemäßigte Breiten SH: 507.038 Messwerte davon 51.584 Regenereignisse), einer Gammaverteilung und ähneln sich in ihren Verläufen. So lässt die unterschiedliche Stichprobengröße nicht als alleinige Ursache der Differenzen zwischen den Niederschlagswahrscheinlichkeiten identifizieren, auch das Auftreten des Niederschlages spielt hierbei eine wichtige Rolle. Während Niederschlag in den Tropen meist aus konvektiven Zellen stammt und somit intermittierender Natur ist, tritt Niederschlag in den höheren Breiten meist als flächiger Niederschlag an Warm- oder Kaltfronten auf (Houze, 1993). Die Messwahrscheinlichkeit eines Niederschlagsereignisses auf einem Forschungsschiff ist deshalb in den Klimazonen höherer Breiten höher als in den tropischen Klimazonen.

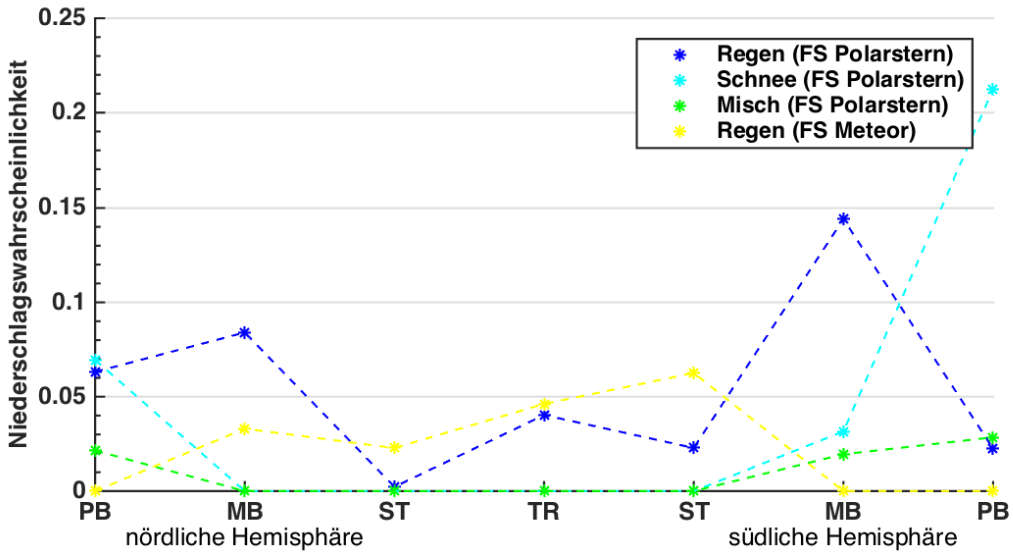

Abbildung 7: Relative Wahrscheinlichkeiten der erfassten Niederschlagsereignisse beider Forschungsschiffe für alle Klimazonen und Phasen beginnend mit den polaren Breiten der nördlichen Hemisphäre (links). Die Farben kennzeichnen unterschiedliche Phasen bzw. Forschungsschiffe. FS Polarstern: blau Regen, türkis Schnee, grün Mischphase. FS Meteor: gelb Regen.

3.1.3 Niederschlagsmaxima, mittlere Raten und Akkumulationen

Abbildung 8 stellt sowohl die maximalen und mittleren Raten, als auch die normierte Akkumulation des Niederschlags unterteilt nach Niederschlagsphase und Klimazone für beide Forschungsschiffe getrennt dar. Ausgehend von den Tropen (TR) in der Mitte jeder Teilabbildung sind links davon die Messungen der nördlichen und rechts die Messungen der südlichen Hemisphäre aufgetragen. Die unterschiedlichen Klimazonen werden durch die Balken repräsentiert. Die Niederschlagsphasen sind farblich gekennzeichnet: blau für Regen, türkis für Schnee und hellblau für Mischphase.

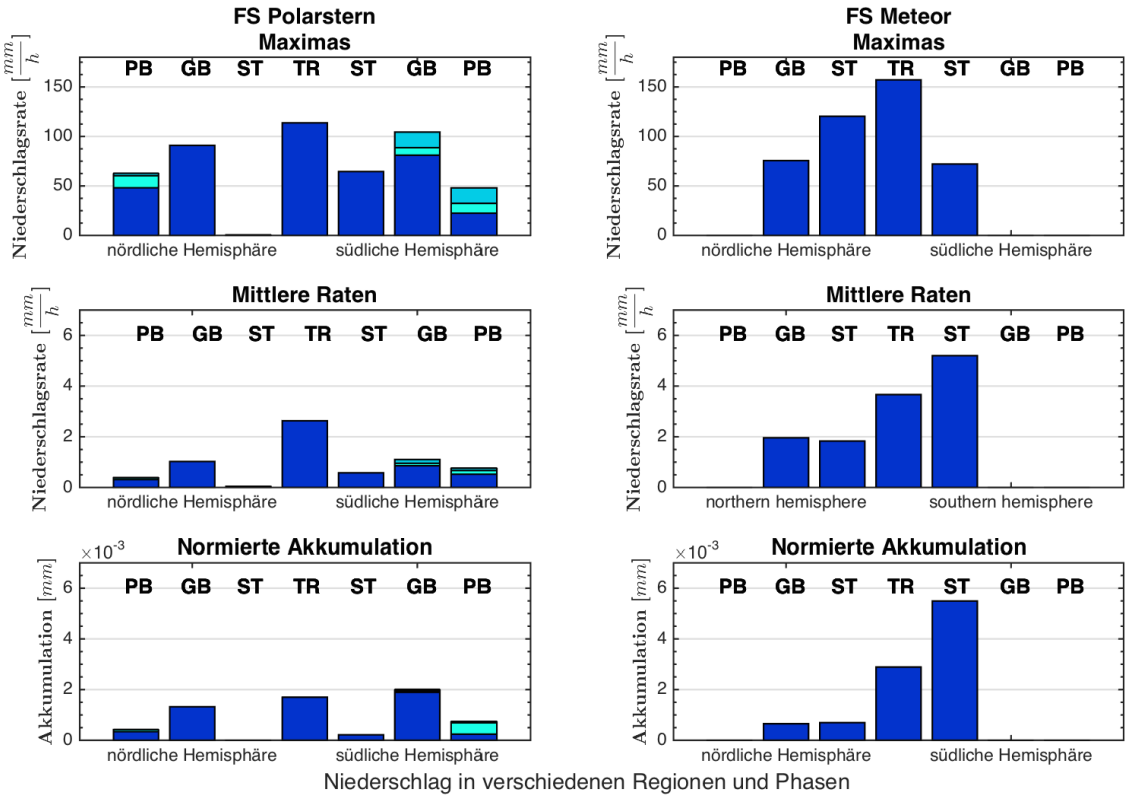

Abbildung 8: Maximale und mittlere Rate in mm/h sowie die normierte Akkumulation des Niederschlages in mm getrennt nach FS Polarstern (links), FS Meteor (rechts) und Klimazone. Die Färbung der Balken zeichnet die Phase aus (blau Regen, türkis Schnee, hellblau Mischphase). Die Klimazonen sind anhand der obenstehenden Kürzel zu identifizieren. TR: Tropen, ST: Subtropen, GB: gemäßigte Breiten, PB: polare Breiten.

Bei den Daten der FS Polarstern weisen die Tropen die höchsten Werte bezüglich mittlerer und maximaler Niederschlagsrate auf, gefolgt von den gemäßigten Breiten beider Hemisphären mit den Tiefdruckgebieten. In den Subtropen fällt der Niederschlag erwartungsgemäß geringer aus. Einzig das Maximum der südlichen Hemisphäre, hervorgerufen durch ein einziges Starkregenereignis (2,1335° S 15,9674° W, 14.11.2010), bildet eine Ausnahme und weicht von der Annahme einer geringen Niederschlagsrate ab (siehe. Kap. 3.1.4). Die in Relation geringe Akkumulation des festen Niederschlages in den polaren Breiten zwischen $3.23e^{-6}$ mm (Mischphase, polare Breiten NH) und $4.49e^{-4}$ mm (Schnee, polare Breiten SH) lässt sich auf das geringe Flüssigwasseräquivalent von Schnee- und Mischphase (Houze, 1993) zurückführen.
Die Verteilung der FS Meteor unterscheidet sich von der der FS Polarstern. Hier dominieren ungewöhnlich hohe Werte in den Subtropen, besonders stark ausgeprägt in der südlichen Hemisphäre. Dies wurde in zwei Fallstudien gesondert untersucht (Kap. 3.1.4). In den Subtropen der südlichen Hemisphäre herrschte, zum Zeitpunkt der Messungen (Mai-Juni 2014) eine niederschlagsreiche Witterung vor.
Wie bereits anhand der Schiffsrouten (Abb. 2) und Tabelle 2 ersichtlich, decken die Messungen der FS Polarstern ein breiteres Spektrum an Klimazonen ab, mit geringerem Sampling in den niedrigeren Breiten im Vergleich zur FS Meteor. Es fällt auf, dass in den vergleichbaren

Klimazonen die Stichprobe der FS Meteor höhere Maximalwerte im Vergleich zu der FS Polarstern aufweist. Dies lässt sich anhand der verschiedenen Aufenthaltsdauern beider Schiffe in den jeweils gleichen Klimazonen erklären (z.B. in den Tropen 35.535 Minuten in vier Jahren der FS Polarstern gegenüber 57.441 Minuten in einem Jahr der FS Meteor). Wie aus den Abbildungen der Schiffsrouten (Abb. 2) erkennbar, konzentrieren sich die Messungen der FS Polarstern auf die mittleren und polaren Breiten beider Hemisphären. Infolgedessen wurden die Tropen und Subtropen auf direktem Wege durchquert, was sich auf die Anzahl der Messungen auswirkt. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich die Messungen der FS Meteor auf die Tropen und Subtropen der nördlichen Hemisphäre. Die maximal aufgetretene Niederschlagsrate wurde dennoch konsistent von beiden Schiffen in den Tropen gemessen. Sie betrug 113.74 mm/h auf der FS Polarstern (5,6315° N 20,2876° W, 11.11.2010) und 157,15 mm/h auf der FS Meteor (4,7839° N 30,2617° W, 30.06.2014). Auffällig ist der Unterschied in den Subtropen der nördlichen Hemisphäre. Während die maximale Rate auf der FS Polarstern mit 0,54 mm/h (26,2337° N 17,2130° W, 05.11.2012) erwartungsgemäß niedrig ist, übertrifft sie auf der FS Meteor sogar die höchste Rate der FS Polarstern und liegt bei 120,35 mm/h (28,5833° N 49,3642° W, 31.01.2015). Während die Wahrscheinlichkeit ein Regencluster zu treffen für die FS Polarstern mit ihrer geraden Schiffsspur durch die Klimazonen niedriger Breiten gering ist, erhöht sie sich erheblich bei den Schiffsspuren der FS Meteor in diesen Breiten (Abb. 2).
Bei den mittleren Raten (Kap. 2.2) liegt das Maximum der FS Polarstern bei 2,63 mm/h (3,67 mm/h, FS Meteor) in den Tropen, das der FS Meteor bei 5,16 mm/h (0,58 mm/h, FS Polarstern) in den Subtropen der südlichen Hemisphäre. Auch hier übersteigen die Werte der FS Meteor die der FS Polarstern um z.T. mehr als das Doppelte. Diese Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Forschungsschiffen setzen sich bei der normierten Akkumulation (Kap. 2.2) fort. Besonders der Wert der südlichen Subtropen setzt sich von den anderen Werten ab. Diese hohen Niederschlagsraten in den Subtropen sind durch wenige, jedoch starke Niederschlagsereignisse verursacht worden. Da gleichzeitig für diese Klimazone nur eine geringe Anzahl von Messdaten (1.465 Niederschlagsminuten) vorliegt, tritt das Phänomen der hohen Niederschlagsraten überproportional stark in Erscheinung.
Die Ereignisse für Schnee und Mischphase der FS Polarstern erreichten maximale Raten von 12,19 mm/h (Schnee, 88,3885° N 51,4697° W, 24.09.2012) und 15,77 mm/h (Mischphase, 52,5108° S 68,4989° E, 12.08.2013). Die normierten Akkumulationen liegen um mindestens eine Größenordnung unter denen der flüssigen Phase, was auf das geringere Flüssigwasseräquivalent bei Schnee und Mischphase oder auf eine Unterschätzung der Raten festen Niederschlages zurückzuführen ist (Houze, 1993). Diese Fragestelllung wird derzeit von dem WMO Feldversuch *Solid Precipitation Intercomparison Experiment* (SPICE, http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/intercomparisons/SPICE/SPICE.html) untersucht.

3.1.4 Fallstudie extremer Subtropenniederschläge

Wie oben bereits hervorgehoben, lieferten die Messungen der FS Meteor für die Subtropen der südlichen Hemisphäre hohe Niederschlagswerte. Diese weichen erheblich von der Klimatologie des HOAPS-Satellitendatensatzes ab. In diesem Zusammenhang muss berücksichtigt werden,

dass eine einzelne Schiffsroute nicht repräsentativ für eine Klimazone ist und somit eine Übereinstimmung mit bestehenden klimatologischen Daten im Einzelfall nicht zu erwarten ist. Daher wird diese große Abweichung zu HOAPS gesondert untersucht und evaluiert.
Den Schiffsrouten der FS Meteor (Abb. 2) ist zu entnehmen, dass das Forschungsschiff im MAM (blaue Linie) und JJA (rote Linie) in den Subtropen der südlichen Hemisphäre unterwegs war. Bei den klimatologischen HOAPS Quartalen (Abb. 3) fällt in den südlichen JJA-Subtropen ein Niederschlagsband auf, welches sich von der Küste Fortalezas über das Cap São Roque (Brasilien) bis hin zur Küste von Recife erstreckt. Dieses Niederschlagsband wurde von der FS Meteor im nördlichsten Bereich befahren. Die Vermutung bestand, dass die hohen Werte der FS Meteor aus eben dieser Region entstammen. Daraufhin wurden die Daten detailliert untersucht, indem dieses Gebiet von den Subtropen extrahiert und den Tropen hinzugefügt wurde. Allerdings konnte keine signifikante Änderung der neu berechneten Größen (Maxima, mittlere Rate und normierte Akkumulation) gezeigt werden. Die hohen OceanRAIN Niederschlagsdaten der FS Meteor gehören somit nicht zu diesem Niederschlagsband. Daraufhin wurden die vom OceanRain Datensatz ermittelten Niederschläge in den Subtropen hinsichtlich Ort und Zeit analysiert und mit dem NASA *Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI) visualisierten, Satellitendaten des TRMM (*Tropical Rainfall Measurements Mission*, Simpson et al., 1996) 3B42 Datensatzes verglichen (Abb. 9). GIOVANNI stellt seit 2003 eine große Bandbreite an Fernerkundungsdaten zur Verfügung. Derzeit steht das GIOVANNI unter Obhut des Goddard Earth Sciences Data and Information Services Centers und beinhaltet Daten vieler verschiedener NASA Missionen, darunter TRMM (Berrick et al., 2009).
Die Niederschlagsmessungen der FS Meteor entstanden während der Zeiträume 08.05.2014 - 23.05.2014 (Abb. 9, links) und 01.06.2014 - 02.06.2014 (Abb. 9, rechts). Die Position des Schiffes und die Zeiträume werden mit den entsprechenden Niederschlagsfeldern von TRMM 3B42 abgeglichen. Wie auf Abb. 9 erkennbar, befanden sich in der Zeit der Schiffsmessungen ausgeprägte Regenfelder in der betroffenen Region. Die einzigen Messungen der FS Meteor in den

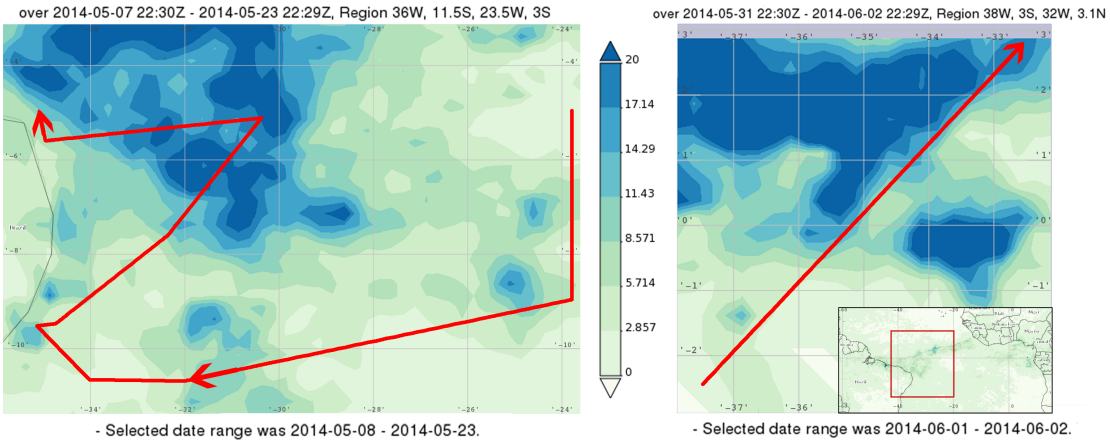

Abbildung 9: Die Daten des TRMM 3B42 für die zu validierenden Zeiträume 11.05.2014 - 15.05.2014 (links) und 01.06.2014 - 02.06.2014 (rechts). Die Skalenfärbung repräsentiert die Menge an akkumuliertem Niederschlag in mm. Die roten Linien beschreiben die Schiffsspuren der FS Meteor, die Pfeile die Fahrtrichtung. Die Miniaturkarte zeigt das grobe Aufenthaltsgebiet der untersuchten Schiffsmessungen. Quelle: http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/.

Subtropen der südlichen Hemisphäre sind in diesen Regenbändern erfasst worden, was die hohen Messwerte erklärt. Somit sind die Daten der FS Meteor korrekt und dennoch atypisch für die Klimatologie. Dieses Ergebnis weist auf das prinzipielle Problem des Undersampling hin. Der geringe Stichprobenumfang für bestimmte Klimazonen, wie z.B. den Subtropen, erschwert eine statistisch repräsentative Auswertung und Bewertung.

3.1.5 Verteilung von Niesel, stratiformen und konvektiven Niederschlägen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den Niederschlagsintensitätsklassen der FS Polarstern und FS Meteor getrennt voneinander untersucht.
Die Einteilung der Intensitätsklassen erfolgt nach Niesel (<0,5 mm/h), stratiformen (0,5-5 mm/h) und konvektiven Niederschlag (>5 mm/h) (nach einer Klassifikation von Houze, 1993). Die Niederschlagsintensitäten dieser drei Klassen werden in Abhängigkeit der jeweiligen Klimazone und Niederschlagsphase (Regen, Schnee, Mischphase) dargestellt.
Abb. 10 zeigt den prozentualen Anteil der jeweiligen Niederschlagsereignisse (Regen, Schnee und Mischphase) in den jeweiligen Klimazonen (linke Seite) sowie die prozentualen Anteile der akkumulierten Niederschlagsmenge (rechte Seite) für die FS Polarstern an. In der Vertikalen sind die entsprechenden Klimazonen und in der Horizontalen die verschiedenen Phasen aufgetragen. Die Kreisdiagramme beschreiben die jeweiligen Anteile der, durch Farben kenntlich gemachten, Intensitätsklassen (Nieselregen blau, stratiform rot, konvektiv gelb) inklusive der Prozentzahlen. Bei weißen Feldern der FS Meteor lagen keine Schiffsmessungen in dieser Klimazone vor (vgl. Tab. 2).
Die Ergebnisse für die polaren Breiten beider Hemisphären und die mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre zeigen bei Schnee- und Mischphase Niesel-Anteile von über 90%. Bei Regen polarer und mittlerer Breiten beider Hemisphären fällt der Anteil auf 66% (mittlere Breiten der südlichen Hemisphäre) ab und wird größtenteils vom stratiformen Anteil kompensiert. Auch in den Subtropen beider Hemisphären dominiert der Anteil an Niesel mit 63% (Subtropen der südlichen Hemisphäre) bis 99% (Subtropen der nördlichen Hemisphäre). Die Tropen besitzen mit 11% den größten Anteil an konvektiven Niederschlag (stratiform: 24,9%, Niesel: 63,7%). In allen anderen Klimazonen und Phasen, mit Ausnahme des Regens der mittleren Breiten beider Hemisphären, liegt der Anteil konvektiven Niederschlags unterhalb von 1,6%.
Bei der FS Meteor (Abb. 11) ist eine Verschiebung zu intensiveren Niederschlagsereignissen erkennbar. Beim Nieselregen liegen die prozentualen Anteile der FS Meteor zwischen 33 und 68% und somit unterhalb der Messungen der FS Polarstern von 63-99% vom Juni 2010 bis Oktober 2014. Die Unterschiede der prozentualen Anteile der beiden anderen Niederschlagsklassen (stratiform, konvektiv) sind bei der FS Meteor geringer ausgeprägt als bei der FS Polarstern. Der Anteil stratiformen Niederschlags in den mittleren Breiten, den Tropen und Subtropen der südlichen Hemisphäre liegt bei über 35% und somit höher im Vergleich zu den entsprechenden Anteilen der FS Polarstern (Maximum in den Tropen mit 25%). Bei konvektivem Niederschlag treten erneut die Subtropen der südlichen Breiten mit einem Anteil von etwa 25% deutlich hervor. In den Tropen beträgt er 15%. Diese Ergebnisse stimmen mit denen aus Kapitel 3.1.2 überein. Hier unterschieden sich z.B. die maximalen und mittleren Raten der Niederschlagsintensität beider

Schiffe in den Subtropen der nördlichen Hemisphären. Diese waren auf der FS Polarstern gering ausgeprägt (maximale Rate 0,54 mm/h, mittlere Rate 0,04 mm/h, Abb. 8) und weisen auf einen dominierenden Anteil an Nieselregen hin. Auf der FS Meteor liegen beide Raten deutlich höher (maximale Rate 120,35 mm/h, mittlere Rate 1,83 mm/h), insofern kann auch ein größerer Anteil höherer Niederschlagsklassen erwartet werden. Durch die größere Aufenthaltsdauer in Tropen und Subtropen beider Hemisphäre hat die FS Meteor häufiger die intensiveren Niederschlagsereignisse gemessen.

Betrachtet man die Akkumulationen treten die stratiformen und konvektiven Ereignisse bei beiden Schiffen stärker hervor. Ein Beispiel sind die konvektiven Niederschlagsereignisse der Polarstern in den Tropen, welche lediglich 11% aller Ereignisse ausmachten, allerdings zu mehr als 80% des in den Tropen gemessenen Niederschlages beitragen (Abb. 11). Einen ähnlichen Sachverhalt liefern auch die Subtropen der südlichen Hemisphäre oder die mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre.

Eine Ausnahme bilden die Subtropen der nördlichen Hemisphäre, da hier über 98% der Niederschlagsereignisse als Niesel auftraten. In den polaren Breiten trägt die flüssige Phase des Niederschlages am stärksten zur Akkumulation bei, was seine Ursache in dem geringeren Flüssigwasseräquivalent der anderen beiden Phasen hat oder aus dem Unterschätzen der Schneeraten durch das Messgerät resultiert. Hier sind die größten Anteile der Akkumulation im stratiformen Niederschlag zu verzeichnen.

Bei der FS Meteor ist die Tendenz zu stärkeren Niederschlagsereignissen gemäß der größeren Anteile stärkerer Niederschlagsklassen deutlich zu erkennen. Mit Ausnahme der Tropen, bei denen ein gleich hoher Anteil von 81% vorliegt, liegen die Anteile der Akkumulation konvektiver Ereignisse in allen Klimazonen stets zwischen 60% - 80%. Ein Grund dafür ist, dass bei der FS Meteor der Anteil konvektiver Ereignisse größer ist (vergleiche Abb. 11).

Zusammenfassend beschreibt ein überwiegender Teil der Niederschlagsereignisse der FS Polarstern in allen Klimazonen und Phasen Ereignisse schwacher Intensität. Bei den Daten der FS Meteor ist eine Verschiebung hin zu stärkeren Niederschlagsereignissen erkennbar. Bei der Akkumulation bilden bei beiden Schiffen die stratiformen und konvektiven Ereignisse die größten Anteile aus, obschon sie nach Ereignissen meist seltenerer auftreten.

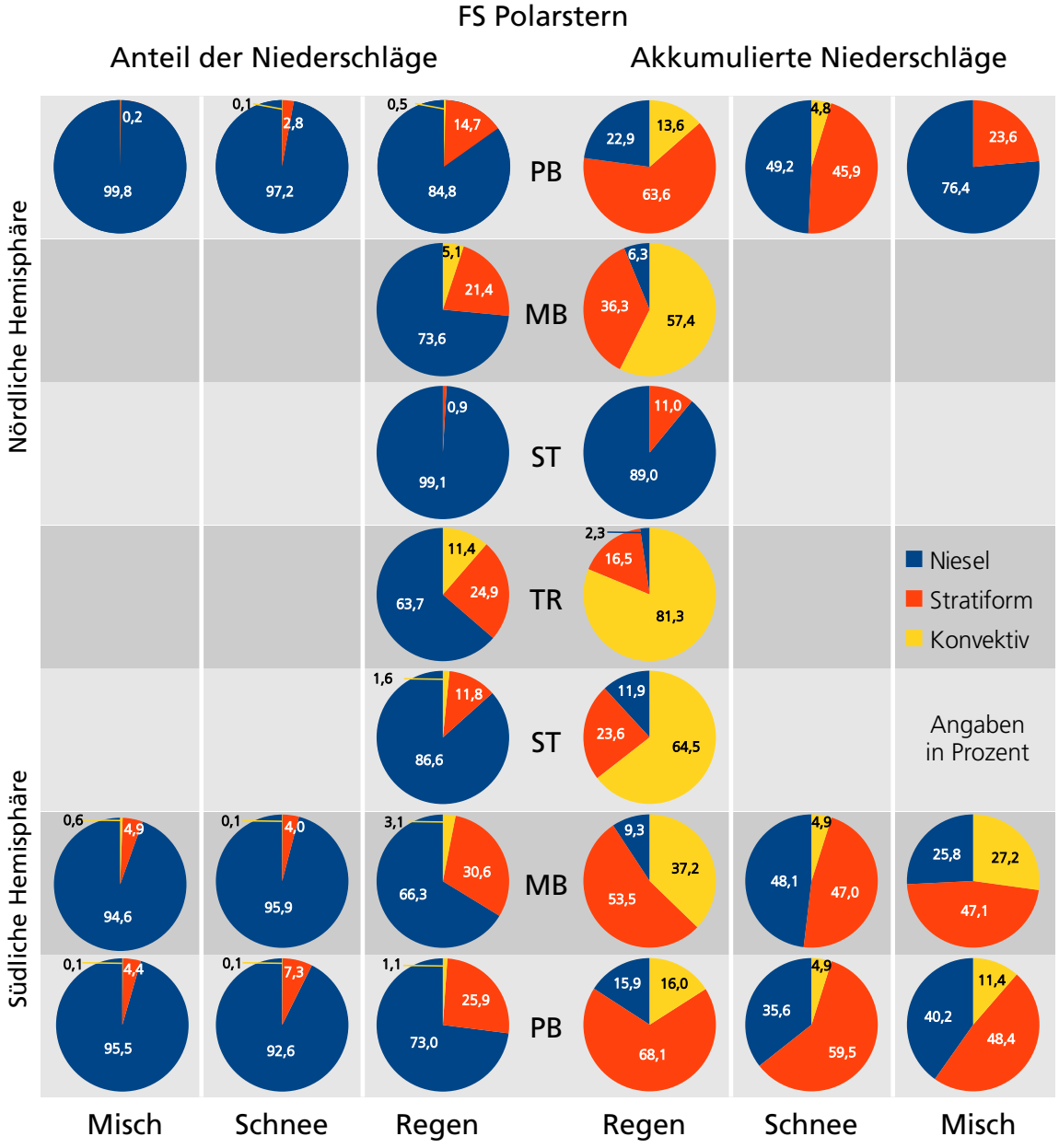

Abbildung 10: FS Polarstern: Anteile der verschiedenen Niederschlagsintensitätsklassen (linke Seite) und deren Anteile an der akkumulierten Menge an Niederschlag (rechte Seite) in Prozent. Auf der Y-Achse sind die Klimazonen (oben beginnend von der nördlichen Hemisphäre) und auf der X-Achse die Phasen des Niederschlages aufgetragen. TR: Tropen, ST: Subtropen, MB: mittlere Breiten, PB: polare Breiten. Die Kreisdiagramme beschreiben die jeweiligen Anteile. Blau repräsentiert Niesel, rot stratiformen und gelb konvektiven Niederschlag.

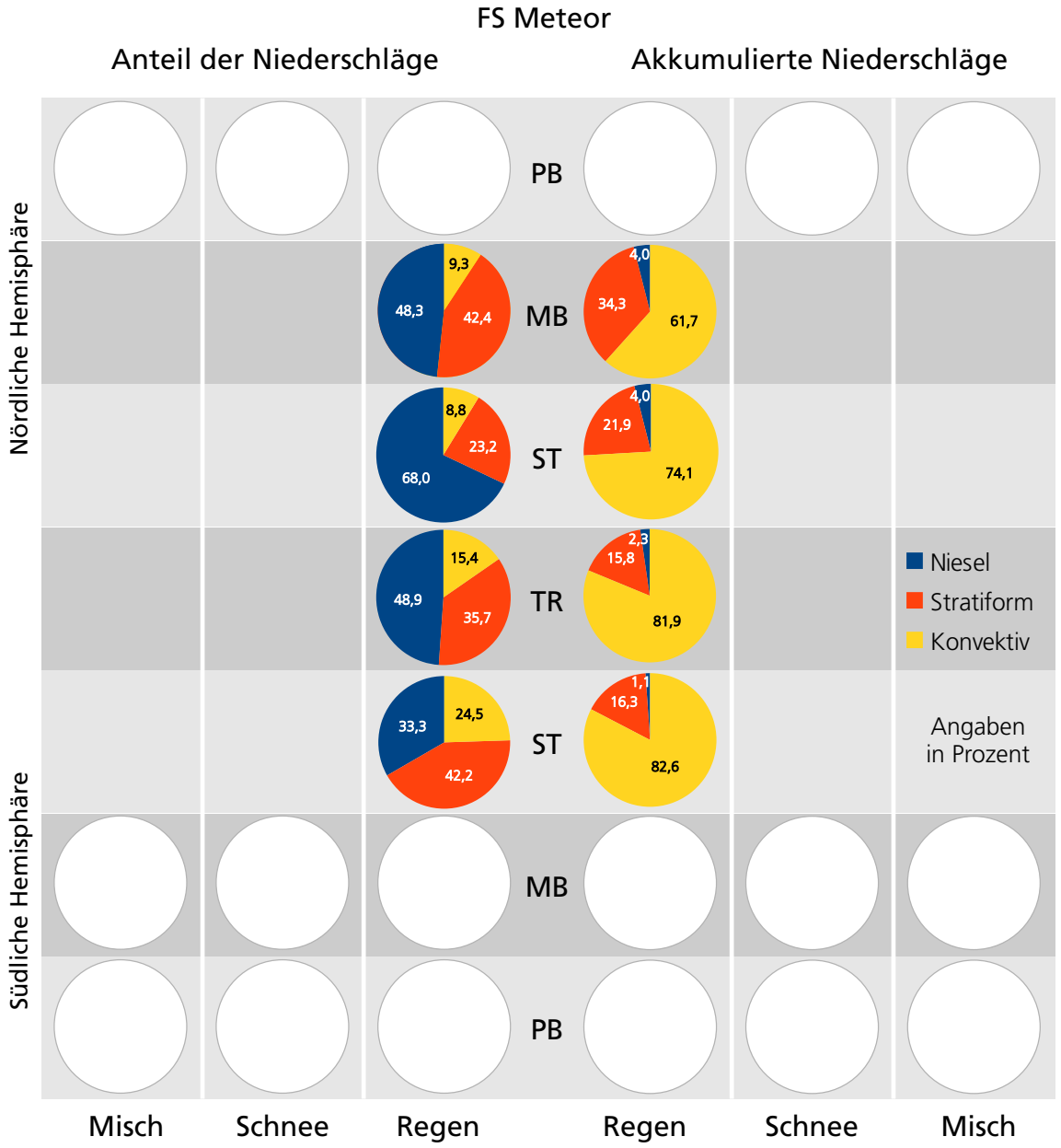

Abbildung 11: FS Meteor: Anteile der verschiedenen Niederschlagsintensitätsklassen (linke Seite) und deren Anteile an der akkumulierten Menge an Niederschlag (rechte Seite) in Prozent. Auf der Y-Achse sind die Klimazonen (oben beginnend von der nördlichen Hemisphäre) und auf der X-Achse die Phasen des Niederschlages aufgetragen. TR: Tropen, ST: Subtropen, MB: mittlere Breiten, PB: polare Breiten. Die Kreisdiagramme beschreiben die jeweiligen Anteile. Blau repräsentiert Niesel, rot stratiformen und gelb konvektiven Niederschlag.

3.1.6 Auswertung der kombinierten Datensätze der FS Polarstern und FS Meteor

Bereits in Kapitel 3.1.4 wurde das Problem des Undersamplings des OceanRAIN Datensatzes in bestimmten Klimazonen beschrieben. Ein großer Vorteil dieses Datensatzes ist jedoch, dass die Messungen von verschiedenen Schiffen gemeinsam ausgewertet werden können, da die Messdaten über kalibrierten ODM470 erhoben werden (Klepp, 2015). Das Auftreten systematischer Fehler durch die gemeinsame Auswertung der Daten verschiedener Schiffe ist somit minimiert.
In Kapitel 2.2 wurden abhängig von den Klimazonen unterschiedliche Messhäufigkeiten beschrieben. Es zeigte sich, dass die Messungen der FS Polarstern auf die hohen und die der FS Meteor stärker auf die niedrigen Breiten des Atlantiks konzentriert sind. Diese je nach Klimazone und Schiff variierende Stichprobengröße ist unterschiedlich repräsentativ für die einzelnen Klimazonen.
Um diesem Sachverhalt zu begegnen und die Niederschlagsdaten der Klimazonen besser untereinander vergleichen zu können, wurde der Standardfehler (Kap. 2, Formel 8) jeder Klimazone und Niederschlagsphase berechnet. Dieser errechnet sich aus den jeweiligen Standardabweichungen dividiert durch die Quadratwurzel des Stichprobenumfangs (der Gesamtanzahl an Messungen für die Klimazone und Phase). Die so normierten Werte der Standardabweichung dienen in diesem Zusammenhang der Vergleichbarkeit der Klimazonen untereinander und sind nicht auf die mittleren Niederschlagsraten zu beziehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 und 4 dargestellt.
Bei der FS Polarstern (Tab. 3) sind die Standardfehler aller drei Phasen in den polaren Breiten beider Hemisphären sehr gering, bedingt durch die hohe Anzahl an Messwerten in diesen Regionen. Gleiches trifft für die mittleren Breiten zu. Die Standardfehler der Tropen und Subtropen der südlichen Hemisphäre sind erwartungsgemäß höher, zurückzuführen auf das geringere Sampling. Der im Vergleich sehr geringe Standardfehler der Subtropen der nördlichen Hemisphäre lässt sich dagegen auf die geringe Variabilität (0-0,54 mm/h, $S = \pm 0{,}09$ mm/h) der dort gemessenen Niederschlagsereignisse (siehe Abb. 4) zurückführen.
Vergleichbare Ergebnisse ergaben sich bei der FS Meteor (Tab. 3), wo die höchsten Standardfehler ebenfalls in den Tropen und Subtropen der südlichen Hemisphäre und die geringeren in den gemäßigten Breiten auftreten. Zwar liegt bei der FS Meteor für die Tropen und Subtropen ein höheres Sampling vor, allerdings kompensiert dieses nicht die entsprechend hohe Variabilität der Niederschlagsraten innerhalb der beiden Zonen (Tropen 0-157,15 mm/h, $S = \pm 10{,}62$ mm/h und Subtropen der südlichen Hemisphäre 0-72,1 mm/h, $S = \pm 9{,}59$ mm/h).
Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Standardfehler des kombinierten Datensatzes beider Schiffe. Der Unterschied von mehr als zwei Größenordnungen zwischen den niedrigen und hohen Breiten bleibt bestehen, allerdings verringern sich die Standardfehler für die Tropen und mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre um 0,08 und 0,0007. Der umgekehrte Effekt tritt jedoch in den Subtropen beider Hemisphären auf. Dort sind die Standardfehler der FS Polarstern um eine Größenordnung (nördliche Hemisphäre) und um etwa ein Drittel (südliche Hemisphäre) geringer im Vergleich zu dem kombinierten Datensatz. Bei den Subtropen der südlichen Hemisphäre lässt sich dieser Umstand auf die sehr hohe Variabilität der Messungen der FS Meteor in dieser Klimazone (vgl. Kap. 3.1.3, 3.1.4 und Abb. 6) zurückführen. Bei den Subtropen der nördlichen

Hemisphäre bedingt die geringe Stichprobengröße und Variabilität (s.o.) den Unterschied. Für die betrachteten Datensätze lässt sich somit in erster Näherung nicht erkennen, dass das Zusammenführen von Messungen verschiedener Schiffe unter der angewandten Methode systematisch niedrigere Standardfehler bedingt.
Mittelfristig wird der Standardfehler für alle Klimazonen sinken, da der Stichprobenumfang des OceanRAIN Datensatzes mit der Zeit ständig zunimmt, die Variabilität der Niederschlagsereignisse (aufgrund maximal möglicher Niederschlagsraten) jedoch beschränkt ist.

Tabelle 3: Vergleich der Standardfehler für die FS Polarstern (links) und die FS Meteor (rechts). PB : polare Breiten, MB : mittlere Breiten, ST : Subtropen, TR : Tropen. Zonen von Nord (oben) nach Süd (unten). n ist die Anzahl der Niederschlagsereignisse

FS Polarstern	Regen (n)	Schnee (n)	Misch (n)	**FS Meteor**	Regen (n)
PB	0,0047 (36.024)	0,0015 (39.421)	$4{,}8e^{-04}$ (12.754)		
MB	0,0344 (9.460)				0,0627 (7.200)
ST	0,0080 (113)				0,0838 (5.106)
TR	0,2311 (1.377)				0,2037 (2.717)
ST	0,1182 (1.123)				0,2505 (1.465)
MB	0,0096 (51.584)	0,0029 (12.541)	0.0079 (7.838)		
PB	0,0117 (9.252)	0,0016 (73.663)	0.0037 (11.645)		

Tabelle 4: Vergleich der Standardfehler für den Datensatz, bestehend aus Messungen beider Forschungsschiffe. MB : mittlere Breiten, ST : Subtropen, TR : Tropen. Zonen von Nord (oben) nach Süd (unten). n ist die Anzahl der Niederschlagsereignisse

beide Schiffe	Regen	n
MB	0,0337	16.660
ST	0,0821	5.219
TR	0,1561	4.094
ST	0,1573	2.588

3.2 Partikelgrößenverteilungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Partikelgrößenklassenverteilung (PSD) analysiert. Es werden zunächst die kombinierten Daten beider Forschungsschiffe und dann die Datensätze beider Forschungsschiffe einzeln untersucht.

3.2.1 PSD: Analyse der kombinierten Daten der FS Polarstern und FS Meteor

Die NPSDs für Regen sind in Abb. 12 sowie die für Schnee- und Mischphase in Abb. 13 dargestellt. Beide Grafiken repräsentieren jeweils die PSD der Klimazonen beginnend mit den polaren Breiten der nördlichen Hemisphäre bis zu den polaren Breite der südlichen Hemisphäre. Die Farben stellen die einzelnen Niederschlagsintensitätsklassen dar, wobei blau für Nieselregen, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag steht. In der Legende sind die jeweiligen Stichprobengrößen (Anzahl der Niederschlagsminuten) angegeben, welche den PSDs zugrunde liegen. Es wurde eine doppelt logarithmische Darstellung gewählt. Auf der X-Achse sind die Partikeldurchmesser in mm und auf der Y-Achse die über die number concentration normierte PSD (NPSD) [$1/m^3$ 1/mm] (vgl. Kap. 2.2, Formel 17) aufgetragen.
Abbildung 11 und 12 zeigen eine Abnahme der NPSD von vielen kleinen Partikeln, hin zu wenigen großen zu erkennen und die Partikel der Schnee- und Mischphase erreichen größere Durchmesser, als die der Regenphase. Die größten erfassten gefrorenen Partikel erreichen einen Durchmesser von bis zu 22 mm, die größten flüssigen 11 mm (jedoch Artefakt s.u). Werden die NPSDs der drei Intensitätsklassen miteinander verglichen, wird ab einem Partikeldurchmesser von ca. 0,6 mm deutlich, dass die NPSD der konvektiven Ereignisse im Mittel eine Größenordnung über denen der stratiformen liegen. Dieser Sachverhalt ist bei der Regenphase deutlich stärker ausgeprägt als bei der Schnee- und Mischphase. Dies könnte auf die deutlich größeren Unterschiede zwischen den stratiformen und konvektiven Raten der Regenphase im Vergleich zu den beiden anderen Phasen (vgl. Abb. 8) zurückzuführen sein. So umfassen die gemessenen konvektiven Ereignisse der Schnee und Mischphase Raten von 5-15 mm/h (Abb. 5), währenddessen gemessene konvektive Regenereignisse Raten von 5-70 mm/h und mehr umfassen (Abb. 4 und Abb. 6). Oberhalb eines Partikeldurchmessers von 0,6 mm fällt die NPSD für Niesel am schnellsten zu größeren Durchmessern ab.
Weiter zeigt sich, dass die Partikel der kleinsten Größenklassen deutlich unterschiedliche Zahlenwerte für die verschiedenen Niederschlagsphasen aufweisen. Bei der Schnee- und Mischphase, also den gefrorenen Partikeln, liegen die NPSDs in den polaren Breiten um eine und in den mittleren Breiten (NH) bis mittleren Breiten (SH) bis zu vier Größenklassen höher als bei Regen. Dies ist auf den geringeren Sättigungsdampfdruck über gefrorenen im Vergleich zu flüssigen Teilchen innerhalb einer Wolke zurückzuführen. Die Moleküle sind im Eis fester gebunden. Währenddessen in einer Wolke Sättigungsdampfdruck für die flüssigen Teilchen vorliegt, herrscht für die gefrorenen eine Übersättigung an Wasserdampf vor. Somit können sich fortlaufend Moleküle an den gefrorenen Partikeln anlagern, während die flüssigen durch fortlaufende Verdunstung zum Erhalt des Dampfdrucks in der Wolke beitragen. Folglich wachsen gefrorene Partikel auf Kosten von flüssigen (Houze, 1993).
Durch die geringe number concentration für kleine Tröpfchengrößen (meist zwischen 10 und

100) besitzen die NPSDs der Regenphase ihr Maximum bei allen drei Intensitätsklassen überwiegend bei einer Tröpfchengröße von ca. 0,6 - 0,8 mm (Abb. 12). Abweichungen von diesem Maximum, resultierend aus der Stichprobengröße, ergeben sich bei den polaren Breiten beider Hemisphären und den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre. Bei Schnee und Mischphase ist ein solches Verhalten nicht nachweisbar und es treten hingegen Nebenmaxima auf (z.B. Abb. 13 polare Breiten, Schneephase).
Besonders auffällig ist der Verlauf der NPSD für Schnee in polaren Breiten der südlichen Hemisphäre. Trotz des, im Vergleich zu den anderen Klimazonen, hohen Samplings schwankt der Verlauf von stratiformer und konvektiver NPSD stark. Ein Unterschied dieser Klimazone ist, dass der verwendete OceanRAIN Datensatz dort Messungen der FS Polarstern in allen Quartalen des Jahres enthält. Es werden somit anders als in den Kurvenverläufen der polaren Breiten der nördlichen Hemisphäre Schneeereignisse der Sommer- und Wintermonate repräsentiert. Daher wurde die NPSD dieser Klimazone getrennt nach australen Sommer- und Wintermonaten untersucht (Abb. 14). Es zeigt sich, dass die Schwankungen allein aus der NPSD der Wintermonate resultieren. Durch die saisonale Aufteilung ergibt sich auch die Vergleichbarkeit der Verläufe der NPSD zwischen den polaren Breiten beider Hemisphären für Schnee in den Sommermonaten (vgl. Abb. 13). In beiden polaren Breiten trat in den Sommermonaten kein konvektiver Schneefall auf.
Betrachtet man weiter die NPSDs für Regen in den außertropischen Klimazonen der südlichen Hemisphäre fallen Messungen von Tropfendurchmessern von 8,0 mm oder größer auf. Hierbei handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um nicht korrekt zugeordnete Phasen, also um ursprünglich gefrorene Teilchen (Mischphase statt Regen). Dies weist auf ein Defizit der bisherigen manuellen Phasenzuweisung des OceanRAIN Datensatzes hin. Die Phasenzuweisung nutzt in der verwendeten Version die Lufttemperatur in 27 m Höhe, den ww-code (gegenwärtiges Wetter des SYNOP-Schlüssels) sowie die theoretische Schnee-/Regenrate für die Unterscheidung (Klepp, 2015). Derzeit wird ein automatischer Algorithmus getestet, welcher zusätzlich noch das 99% Percentil des Partikeldurchmessers und die relative Feuchte in die Zuordnung berücksichtigt (Burdanowitz et al., 2015). Dieser Algorithmus wird das Postprocessing deutlich beschleunigen und die Phasenzuweisung präzisieren, da zusätzlich physikalische Variablen zur Anwendung kommen.

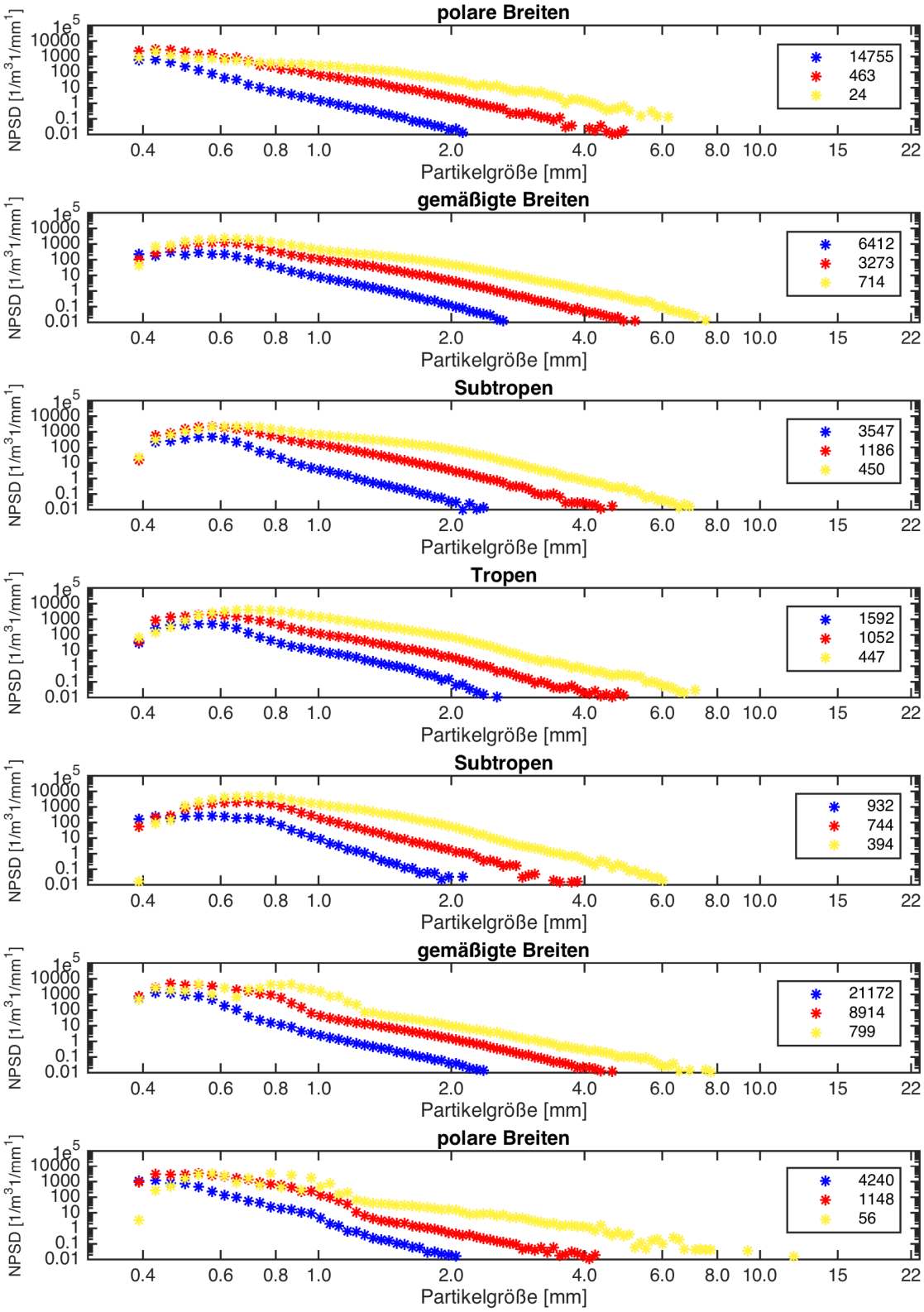

Abbildung 12: NPSD der Regenphase für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor. Auf der logarithmischen X-Achse ist die Partikelgröße in mm und auf der logarithmischen Y-Achse ist die NPSD in $1/m^3 1/mm$ aufgetragen. Die Farbcodierung der Intensitätsklassen: blau für Nieselregen, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag. In der Legende wird zusätzlich die Anzahl der Niederschlagsminuten aufgeführt, Zonen von Nord (oben) nach Süd (unten).

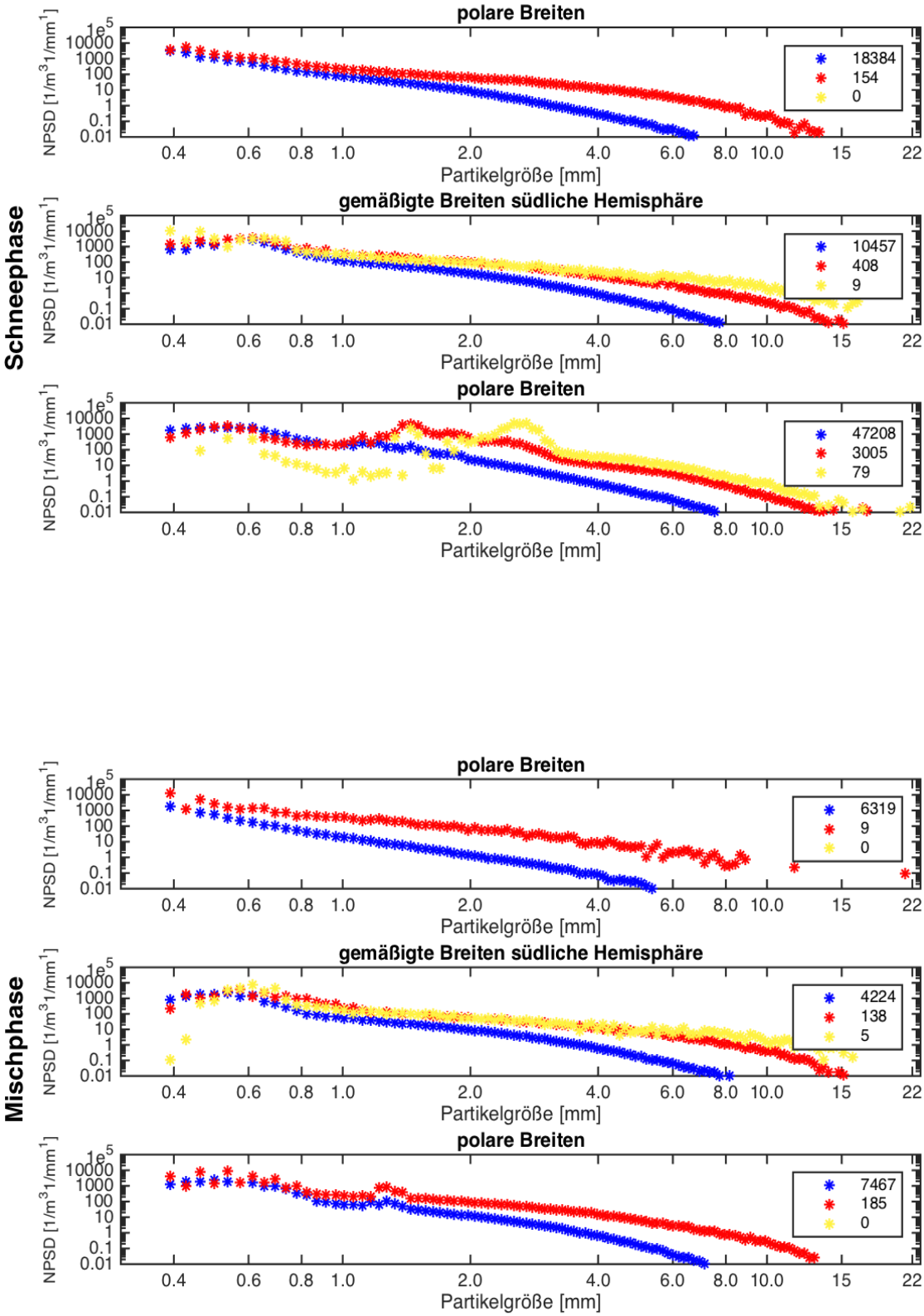

Abbildung 13: NPSD für Schnee und Mischphase für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 der FS Polarstern und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor. Auf der logarithmischen X-Achse ist die Partikelgröße in mm und auf der logarithmischen Y-Achse ist die NPSD in $1/m^3 1/mm$ aufgetragen. Die Farbcodierung der Intensitätsklassen: blau für Niesel, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag. In der Legende wird zusätzlich die Anzahl der Niederschlagsminuten aufgeführt, Zonen von Nord (oben) nach Süd (unten).

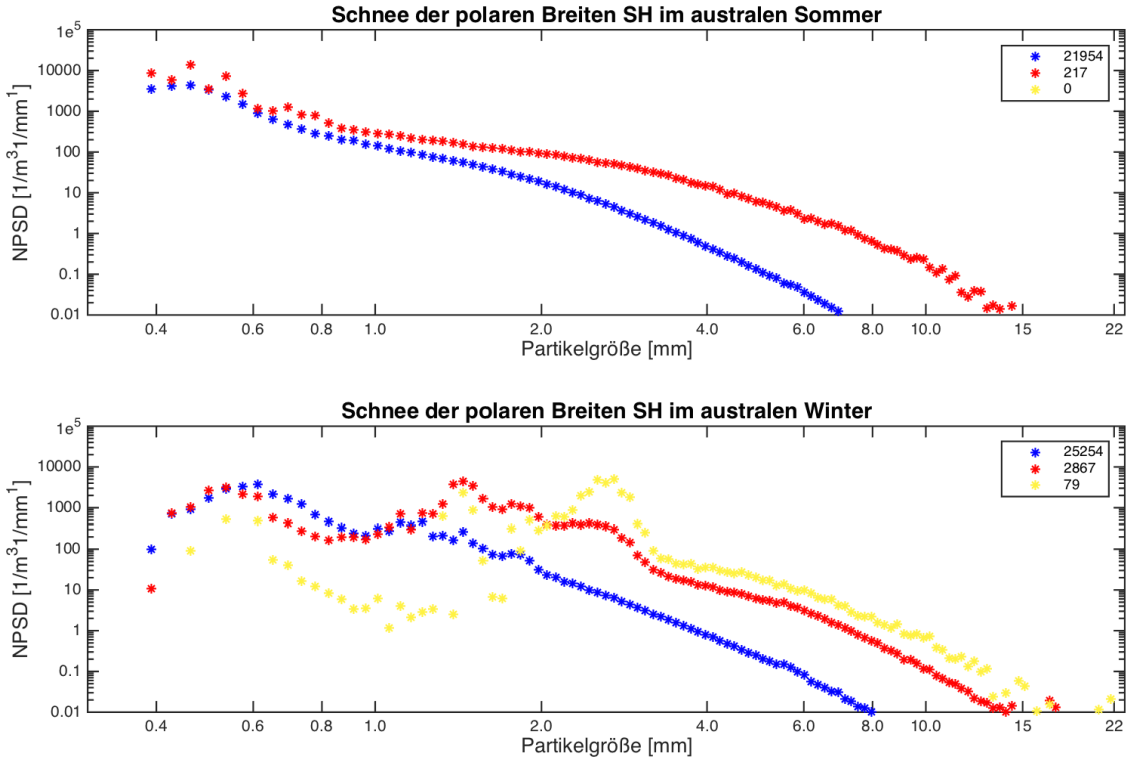

Abbildung 14: NPSD der FS Polarstern in den polaren Breiten der südlichen Hemisphäre (SH) für Schnee, differenziert nach australem Sommer (oben) und australem Winter (unten). Auf der logarithmischen X-Achse ist die Partikelgröße in mm und auf der logarithmischen Y-Achse ist die NPSD in $1/m^3 1/mm$ aufgetragen. Farbcodierung der Intensitätsklassen: blau für Nieselregen, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag. Legende: Anzahl der Niederschlagsereignisse.

3.2.2 Vergleich der Datensätze von FS Polarstern und FS Meteor

Wie unter 2.2 und 3.1.6 beschrieben, fallen die Stichprobengrößen beider Forschungsschiffe in den jeweiligen Klimazonen, aufgrund der variierenden Schiffsrouten und der Dauer der Expeditionen, unterschiedlich groß aus. In diesem Kapitel soll daher untersucht werden, welche Auswirkungen die Stichprobengröße auf die NPSD hat. Dieser Vergleich wird am Beispiel der Tropen durchgeführt. Für den PSD-Datensatz der FS Polarstern stehen in den Tropen 501 Messwerte (ohne wahre Null Werte) zur Verfügung. Diesen stehen 2.590 Messwerte (ohne wahre Null Werte) der FS Meteor gegenüber.

Abb.15 zeigt die NPSD beider Schiffe in den Tropen. Der Aufbau von Abb. 15 ist identisch mit denen von Abb. 12 und 13. Das Spektrum der Partikelgrößen, das von allen drei Intensitätsklassen abgebildet wird, ist bei beiden Forschungsschiffen gleich und variiert zwischen 0.4 und 8.0 mm. Ebenfalls gleichen sich die jeweils größten gemessenen Partikeldurchmesser der Intensitätsklassen (Niesel $\sim$ 2,4 mm, stratiform $\sim$ 4,9 mm, konvektiv $\sim$ 7,1 mm). Unterschiede bestehen bei den Verläufen der einzelnen NPSDs. Die Messreihen der FS Polarstern weisen im Gegensatz zu denen der FS Meteor nicht die geringe NPSD für die kleinsten Tröpfchengrößen auf (siehe Kapitel 3.2.1). Damit einhergehend besitzen die NPSDs der FS Polarstern ihr Maximum bei den

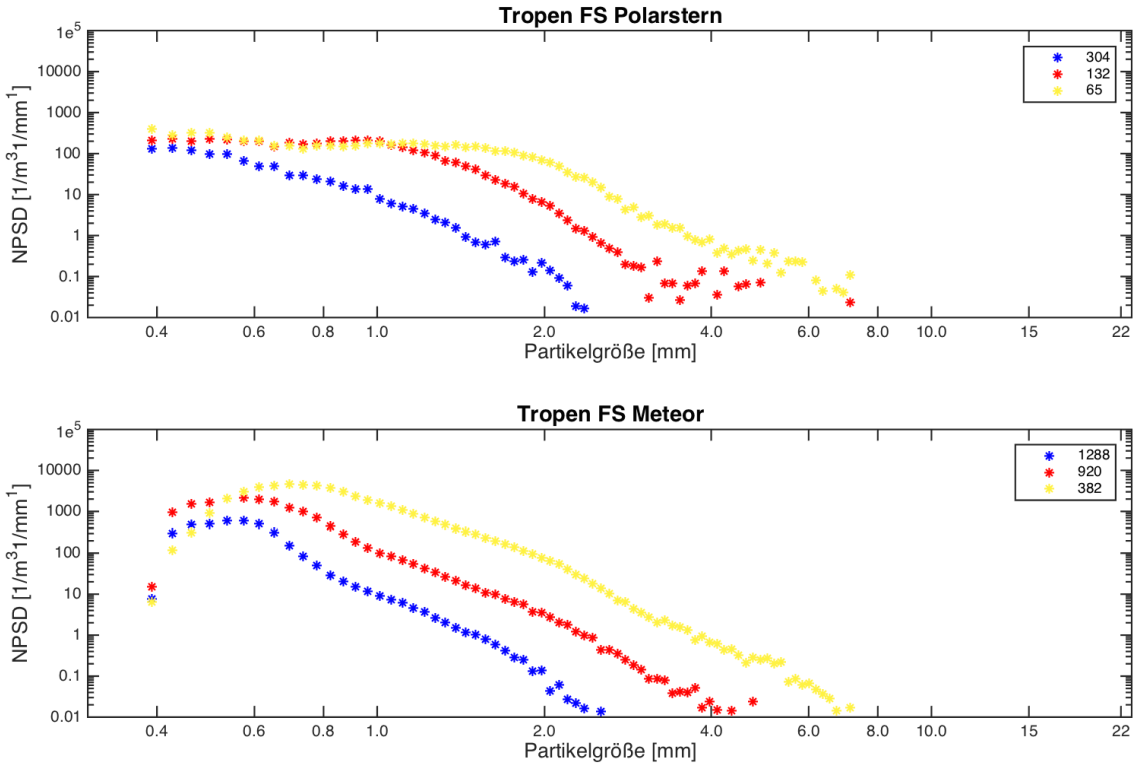

Abbildung 15: Die NPSD für Regen beider Forschungsschiffe in den Tropen für den Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern (oben) und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor (unten). Auf der logarithmischen X-Achse ist die Partikelgröße in mm und auf der logarithmischen Y-Achse ist die NPSD in $1/m^3 1/mm$ aufgetragen. Farbcodierung der Intensitätsklassen: blau für Nieselregen, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag. Legende: Anzahl der Niederschlagsminuten.

kleinsten Tröpfchengrößen (0,4 mm) und nicht wie die NPSDs der FS Meteor bei 0.7 mm (vgl. Kapitel 3.2.1). Ebenfalls liegt das Maximum der FS Polarstern für alle drei Intensitätsklassen um mehr als eine Größenordnung unter dem der FS Meteor. Ein weiterer Unterschied ist in den Verläufen der Kurven von stratiformen und konvektiven Ereignisse zu erkennen. Anders als die Kurven der FS Meteor, liegen bei der FS Polarstern die stratiformen und konvektiven NPSDs bis zu einer Tröpfchengröße von 1,0 mm dicht beieinander. Die NPSDs der FS Meteor bilden bei diesen Tröpfchengrößen bereits distinkte Unterschiede von bis zu einer Größenordnung aus (siehe Abb. 15).

Ebenfalls ist zu erkennen, dass die NPSD der FS Polarstern, besonders ab einer Tröpfchengröße von 3,0 cm, einer höheren Variabilität unterliegt.

Um den Einfluss der Stichprobengröße auf die NPSDs näher zu untersuchen, wurden die Stichprobengrößen beider Forschungsschiffe zufallsbasiert auf 150 Messminuten verringert (Abb. 16). Die hierüber erhaltenen NPSDs weisen vergleichbare Eigenschaften wie Abb. 15 für die kleineren Größenklassen zwischen 0.5-2 mm auf. Lediglich die Variabilität der oberen Größenklassen zeigt deutliche Veränderungen, da diese Ereignisse seltener sind und somit über die zufällige Auswahl von Messwerten weniger repräsentiert werden.

Diese Methodik wurde für verschiedene Stichprobengrößen (100, 200, 250 Messminuten) durch-

geführt, mit gleichbleibendem Resultat. Ein grundlegender Einfluss der Stichprobengröße auf den Verlauf der NPSD lässt sich somit nicht nachweisen.

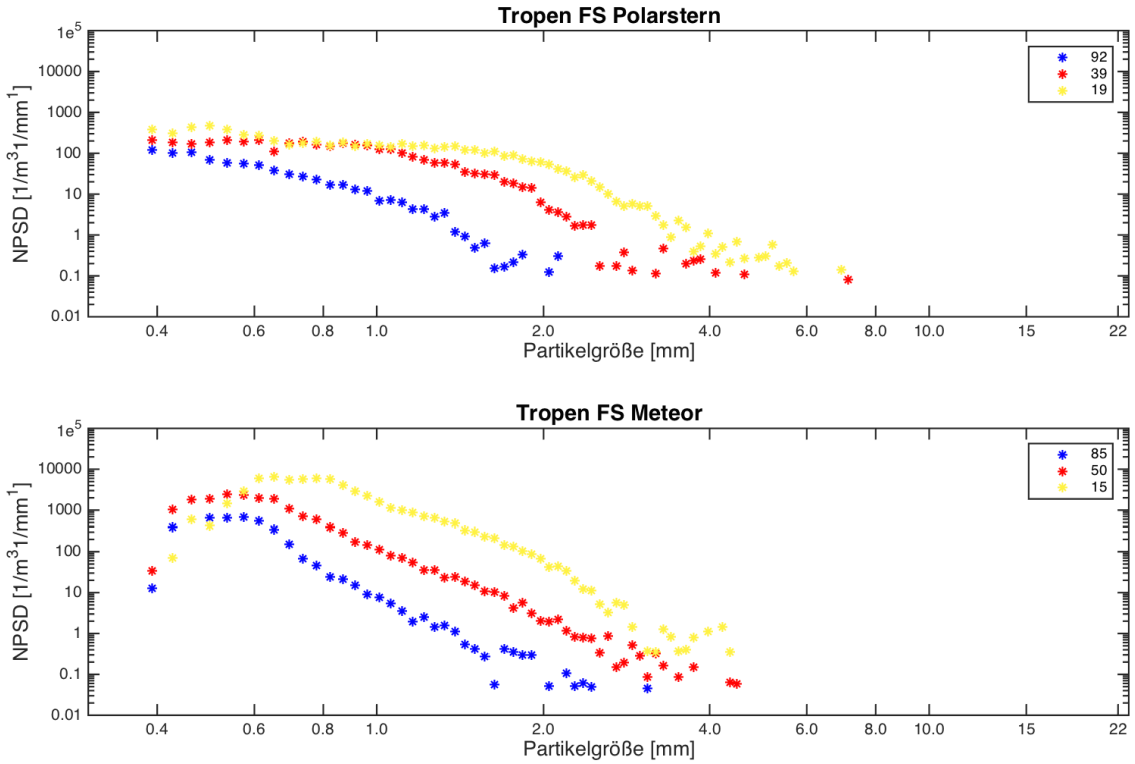

Abbildung 16: Die NPSD für Regen beider Forschungsschiffe in den Tropen für den gesamten Zeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014 für die FS Polarstern (oben) und März 2014 bis Februar 2015 für die FS Meteor (unten) mit eingeschränkter Stichprobengröße von 150 zufällig gewählter Messminuten pro Forschungsschiff. Auf der logarithmischen X-Achse ist die Partikelgröße in mm und auf der logarithmischen Y-Achse ist die NPSD in $1/m^3 1/mm$ aufgetragen. Farbcodierung der Intensitätsklassen: blau für Nieselregen, rot für stratiformen und gelb für konvektiven Niederschlag. Legende: Anzahl der Niederschlagsminuten.

Kapitel 4

Schlussfolgerungen und Ausblick

OceanRAIN ist der weltweit erste Datensatz systematischer in situ Niederschlagsmessungen über den Ozeanen, der auf hochqualitativen Disdrometermessungen beruht. Hochqualitativ aufgrund der Zuverlässigkeit, der Messgenauigkeit und der Möglichkeit der Phasenunterscheidung. In dieser Arbeit wurden die OceanRAIN Daten auf die statistischen Eigenschaften des Parameters Niederschlag untersucht. Hierfür wurden die Datensätze zweier Forschungsschiffe, der FS Polarstern (Messzeitraum von Juni 2010 bis Oktober 2014) und der FS Meteor (Messzeitraum von März 2014 bis Februar 2015) ausgewertet. Hierfür wurden die Niederschlagsdaten verschiedenen Klimazonen zugeordnet und die Phasen und Intensitäten in Beziehung zueinander gesetzt und analysiert.
Die Zuordnung nach Klimazonen (Tropen, Subtropen, gemäßigte Breiten, polare Breiten) wurde mit Hilfe des HOAPS-Satellitendatensatzes durchgeführt, wodurch klimatologische Niederschlagsintensitäten als Unterscheidungskriterium genutzt werden konnten. Die Unterteilung nach Intensitäten in Niesel (0-0,5 mm/h), stratiformen (0,5-5 mm/h) und konvektiven Niederschlag (>5 mm/h) erfolgte nach Houze (1993).

Verteilungen der Niederschlagsraten
Mit Hilfe der Verläufe von Phasenhistogrammen und angepassten Gamma-PDFs konnte aus den Datensätzen beider Forschungsschiffe für alle erfassten Phasen eine Gammaverteilung nachgewiesen werden. Ob Niederschlag über dem Ozean prinzipiell einer Gammaverteilung folgt oder dieses Ergebnis aus den vorliegenden Stichproben resultiert, sollte mit weiteren OceanRAIN Daten überprüft werden.

Maximale Rate und Fallstudie
Die Datensätze beider Schiffe weisen jeweils in den Tropen die höchsten gemessenen Niederschlagsraten von 113,75 mm/h (FS Polarstern) und 157,15 mm/h (FS Meteor) auf. Bei der FS Polarstern lieferten die mittleren Breiten beider Hemisphären des Atlantiks mit den Zugbahnen der Tiefdruckgebiete die nächst höheren Niederschlagsraten (NH 90,95 mm/h und SH 64,56). Die Niederschlagsraten von Schnee und Mischphase erreichten maximale Werte von 15,77 mm/h (Mischphase der mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre).
Bei der FS Meteor fallen die sehr hohen Niederschlagswerte in den Subtropen der südlichen Hemisphäre auf. Im Rahmen einer Fallstudie (Kap. 3.1.4) konnten mit Hilfe von TRMM 3B42

Satellitendaten intensive Niederschlagsereignisse zu den Zeitpunkten der FS Meteor-Messungen bestätigt werden. Solche Fallstudien bieten eine gute Möglichkeit die Plausibilität, auffälliger Messungen zu prüfen. Allerdings ist ein direkter Vergleich von Schiffs- und Satellitenmessungen dadurch erschwert, dass die notwendige Übereinstimmung der Schiffs- und Satellitenspuren nur selten gegeben ist. Eine mögliche Lösung liefern Kollokationen der OceanRAIN- mit Satellitendaten.

Anteile der Intensitäten

Bei der Betrachtung der Intensitäten dominieren geringe Raten (Nieselregen) die Messungen. Sie machen bei der FS Polarstern zwischen 60-99% der Ereignisse und auf der FS Meteor zwischen 45-70% (Ausnahme Subtropen SH mit 33%) aus. Stratiforme und vor allem konvektive Ereignisse dominieren hingegen den Anteil an akkumulierten Niederschlag. So konnte gezeigt werden, dass konvektive Niederschlagsereignisse, welche meist bei einer Ereignishäufigkeit von 10-15% (Ausnahme Subtropen SH, FS Meteor mit 24%) lagen, zu mehr als 60-80% der Akkumulation beitragen.

Kombinierte Datensätze beider Schiffe

Die Forschungsschiffe lieferten unterschiedliche Stichprobengrößen bezogen auf die Klimazonen. Ein Vorteil von OceanRAIN ist, Daten verschiedener Forschungsschiffe kombinieren zu können. Um dies zu überprüfen, wurden die Standardfehler der einzelnen und kombinierten Datensätze miteinander verglichen. Allerdings ergab sich kein eindeutiges Ergebnis, da bei dieser Methode mal die Streubreite der Messungen, mal die Stichprobengröße überwiegt. Mit zunehmender Größe des gesamten Datensatzes bei Fortführung von OceanRAIN wird der Standardfehler für alle Klimazonen jedoch sukzessive sinken, da der Stichprobenumfang immer größer wird, die Variabilität der Niederschlagsereignisse (aufgrund maximal möglicher Niederschlagsraten) jedoch beschränkt ist.

NPSD

Die NPSDs der einzelnen Klimazonen zeigten, dass in den kleinsten Größenklassen gefrorene Partikel deutlich häufiger auftreten als flüssige. Dies ist zurückzuführen auf die unterschiedlichen Sättigungsdampfdrücke über diesen Partikeln. Ebenfalls konnten distinkte Unterschiede von bis zu zwei Größenklassen bei Regen zwischen den NPSDs der einzelnen Intensitätsklassen beschrieben werden, nicht jedoch bei Schnee oder Mischphase. Diese Unterschiede resultieren zum Teil aus den Streubreiten der konvektiven Niederschlagsraten, welche bei Regen deutlich höher ausfallen, als bei den anderen beiden Phasen. Um dem zu begegnen, können die stratiformen sowie konvektiven Niederschlagsereignisse in kleinere, identisch lange Intervalle aufgeteilt und die NPSDs miteinander verglichen werden. Allerdings erwies sich die Festlegung der Intervallbreiten in Bezug auf die Anzahl stratiformer oder konvektiver Ereignissen pro Intervall als nicht erfolgreich durchführbar und wurde daher in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Bei Betrachtung der NPSD von Schnee und Mischphase fiel die hohe Variabilität der NPSD für Schnee in den polaren Breiten der südlichen Hemisphäre auf. Dort lagen, anders als in den polaren Breiten der nördlichen Hemisphäre, Messungen aus den Sommer- und Wintermonaten vor. Daraufhin wurden diese Jahreszeiten getrennt voneinander betrachtet und es ergab sich,

dass die hohe Variabilität allein aus der NPSD der Wintermonate resultierte. Die NPSD der Sommermonate glich ihrem Gegenstück auf der nördlichen Hemisphäre und wies keine konvektiven Ereignisse auf.
Ein Vergleich der Messungen zwischen beiden Forschungsschiffen in den Tropen zeigte zudem, dass die NPSDs beider Schiffe Unterschiede aufweisen. Die Vermutung lag Nahe, dass die Unterschiede aus den unterschiedlichen Stichprobengrößen (2590 Messminuten FS Meteor, 501 Messminuten FS Polarstern) der Datensätze stammen. Zur Überprüfung wurden die Stichprobengröße der beiden Schiffe zufallsbedingt angeglichen und es ergab sich, dass die Stichprobengröße ausschlaggebend für die Variabilität der oberen Größenklassen ist. Der Verlauf der NPSD der Größenklassen von 0.5-2 mm hängt jedoch nicht maßgeblich von der Stichprobengröße ab. Eine abschließende Erklärung zu den unterschiedlichen NPSDs beider Schiffe in den Tropen lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Daten noch nicht finden.

Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass eine große Diversität an Niederschlagsereignissen gemessen wurde und erlauben einen detaillierten Einblick in die Eigenschaften des gemessen Niederschlags. Des Weiteren bietet der Datensatz eine große Bandbreite von Anwendungs- und Untersuchungsmöglichkeiten, die Gegenstand weiterer Studien sein können.
So können die PSDs von OceanRAIN mit anderen internationalen Datensätzen verglichen werden. Über den Ozeanen ist dies vorerst nur eingeschränkt möglich, da OceanRAIN dort die erste Datenquelle ist, allerdings stellen die Ergebnisse von Tokay et al. (2013) eine potentielle Referenz für Disdrometermessungen über Land dar. Dieser Vergleich könnte helfen, Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Niederschlagsverteilung über dem Ozean und dem Land herauszuarbeiten.
Weiter kann die Einteilung in Niesel, stratiform und konvektiv nach Houze (1993) und deren Einfluss auf die Ergebnisse untersucht werden. Es ist davon auszugehen, dass für die Unterscheidung der Niederschlagsintensitäten weitere Faktoren, wie die Dauer des Niederschlagsereignisses, PSD und die Standardabweichung der Niederschlagsraten eine wichtige Rolle spielen. In der Definition nach Houze finden diese Faktoren keine Anwendung.
Der OceanRAIN Datensatz ermöglicht zudem Untersuchungen beispielsweise zu den Einflüssen der 5 m Wassertemperatur oder der absoluten Windgeschwindigkeit auf den Niederschlag und die Verdunstung. Außerdem ist es möglich Schiffsrouten in denselben Regionen zu unterschiedlichen Quartalen zu identifizieren und ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu analysieren.
Ferner lässt sich die, in Kapitel 3.2.1 beschriebene, fehlerhaften Zuweisung der Partikel mit dem von Burdanowitz et al. (2015) entwickelten Algorithmus beheben und das Postprocessing beschleunigen.
Bisher beschränken sich die Aussagen zu Niederschlag auf die Verhältnisse des Atlantischen Ozeans. Die Auswertung weiterer OceanRAIN Daten ermöglicht ein Vergleich der Niederschlagsereignisse zwischen den drei Ozeanen Indik, Pazifik und Atlantik.
Aus den PSDs können Informationen über die Beziehung zwischen Regenrate und Radarreflektivität (Z-R Beziehung) abgeleitet werden. Dies ermöglicht Kalibrierungen von Radaren auf Schiffen sowie auf Satelliten.

Im Januar 2016 wird im Rahmen des Projektes CAPRICORN[1], eingebunden in der Kampagne SOCRATES[2], ein OceanRAIN-Disdrometer des Typs ODM470 sowie ein Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) auf dem australischen Forschungsschiff FS Investigator installiert. Eines der Ziele von CAPRICORN ist es, die Daten des DPR mit den Daten eines an einem Satelliten angebrachtem DPR (GPMDPR) zu vergleichen. Das Schiff folgt während dieses Projekts der Spur des Satelliten. Durch eine Kollokation kann das GPMDPR mit dem Schiffs-DPR unter Zuhilfenahme des ODM470 geeicht werden.

[1] Clouds, Aerosols, Precipitation, Rasiation and atmospherIc Composition Over the souteRn oceaN

[2] Southern Ocean Clouds, Radiation, Aerosol Transport Experimental Study - eine Global Precipitation Measurement Ground Validation (GPM GV) Kampagne

Kapitel 5

Literatur

Andersson, A., Fennig, K., Klepp, C., Bakan, S., Graßl, H., Schulz, J.: The Hamburg ocean atmosphere parameters and fluxes from satellite data — HOAPS-3, Earth Syst. Sci. Data, 2 (2010), 215–234, http://dx.doi.org/10.5194/essd-2-215-2010.

Andersson, A., Klepp, C., Fennig, K., Bakan, S., Graßl, H., Schulz, J.: Evaluation of HOAPS-3 ocean surface freshwater flux components, J. Appl. Meteorol. Climatol., 50 (2011), 379–398, http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2341.1.

Berrick, S., Leptoukh, G., Farley, J.D., Rui, H.: Giovanni: A web service workflow-based data visualization and analysis system.,IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. (2009), 47, 106–113.

Bourlès, B., Lumpkin, R., McPhaden, M.J., Hernandez, F., Nobre, P., Campos, E., Yu, L., Planton, S., Busalacchi, A., Moura, A.D., Servain, J., Trotte, J.: The Pirata Program: History, Accomplishments, and Future Directions, Bull. Am. Meteorol. Soc., 89 (2008), 1111–1125, http://dx.doi.org/10.1175/2008BAMS2462.1.

Burdanowitz, J., Klepp, C., Bakan, S.: An automatic precipitation phase distinction algorithm for optical disdrometer data over the global ocean, Atmos. Meas. Tech., Discuss., 2015, 8, 13645-13691, doi:10.5194/amtd-8-13645-2015.

Clemens, C.: Machbarkeitsstudie zur räumlichen Niederschlagsanalyse aus Schiffsmessungen über der Ostsee, Dissertation Christian-Albrechts-Universität, Kiel (2002).

Fennig, K., Andersson, A., Bakan, S., Klepp, C., Schröder, M.: Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data - HOAPS 3.2 - Monthly Means / 6-Hourly Composites. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (2012).

GIOVANNI: URL: http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/ Stand 23.09.2015.

Hasse, L., Großklaus, M., Uhlig, K., Timm, P.: A ship rain gauge for use under high wind speeds, J. Atmos. Ocean. Technol., 15 (1998), 380–386.

HOAPS: URL: http://hoaps.org/index.php?id=cimages&type=season&par=rain&season=03&submit= submit, Stand 05.08.2015.

Houze, R.A.Jr.: Cloud Dynamics, Academic Press, San Diego (1993).

Houze, R.A.Jr.: Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox?, Bull. Am. Meteorol. Soc. (1997), 78, 2179–2196.

IPCC, AR.: „Intergovernmental panel on climate change.“, Climate change 2007: Synthesis report (2007).

Kent, E.C., Ball, G., Berry, D.I., Fletcher, J., Hall, A., North, S., Woodruff, S.D.: The voluntary observing ship (VOS) scheme, In: J. Hall, D.E. Harrison, D. Stammer (Eds.), Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Societyvol. 2, ESA Publication WPP-306, Venice, Italy (2010), 21–25,

http://dx.doi.org/10.5270/OceanObs09.cwp.48, 551-561 (September 2009).

Klepp, C: The oceanic shipboard precipitation measurement network for surface validation — OceanRAIN, Atmospheric Research, Elsevier (2015), doi: 10.1016/j.atmosres.2014.12.014.

Lempio, G.: Machbarkeitsstudie zur Messung festen Niederschlags mit dem Optischen Disdrometer,PhD thesis Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel (2006).

Lempio, G., Bumke, K., Macke, A.: Measurement of solid precipitation with an optical disdrometer, Adv. Geosci., 10 (2007), 91–97.

Levizzani, V., Laviola, S., Cattani, E.: Detection and measurement of snowfall from space,Remote Sens., 3 (2011), 145–166.

Oki, T., Browning, K.A.,Gurney R.J. (Eds.): The Global Water Cycle. Global Energy and Water Cycles, Cambridge, University Press, 10–29 (1999).

Romanova, V., Köhl, A., Stammer, D., Klepp, C., Andersson, A., Bakan, S.: Sea surface freshwater flux estimates from GECCO, HOAPS and NCEP, Tellus A, 62 (4) (2010), 435–452.

Simpson, J., Kummerow, C., Tao, W.-K., Adler, R.F.: On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Meteorol. Atmos. Phys. 60, 19-36 (1996). Soares, C.: Effect of Heavy Weather Maneuvering on the Wave Induced Vertical Bending Moments in Ship Structures, Journal of Ship Research (1990), 34(1), 60–68.

Stephens, G.L., Li, J.L., Wild, M., Clayson, C.A., Loeb, N., Kato, S., L'Ecuyer, T., Stackhouse, P.W., Andrews, T.: An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations, Nat. Geosci., 5 (2012), 691–696 http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1580.

Tokay, A., Petersen, W.A., Gatlin, P., Wingo, M.: Comparison of Raindrop Size Distribution Measurements by Collocated Disdrometers, J. Atmos. Ocean. Technol. (2013), 1672-1690.

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J.: Earth's global energy budget, Bull. Am. Meteorol. Soc., 90 (2009), 311–323.

Weller, R.A., Bradley, E.F., Edson, J.B., Fairall, C.W., Books, I., Yelland, M.J., Pascal, R.W.: Sensors for physical fluxes at the sea surface: energy, heat, water, salt, Ocean Sci., 4 (2008), 247–263.

Yevjevich, V.: Probability and Statistics in Hydrology, Water Resources Publ., Fort Collins, Colorado (1972).

Danksagung

„Einen Augenblick lang passierte gar nichts. Dann, ungefähr nach einer Sekunde oder so, passierte immer noch nichts.“ (Douglas Adams, Per Anhalter durch die Galaxis, S.182).

Diese Beschreibung bezeichnet gut den zeitweisen Fortschritt der Niederschrift dieser Arbeit, während des Auftretens diverser Probleme. Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Prof. Dr. Stefan Bühler und Dr. Christian Klepp, welche sich stets Zeit für die Beantwortung meiner Fragen genommen, meine Ergebnisse kritisch hinterfragt und durch ihre moralische Unterstützung einen großen Teil zur Vollendung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls gilt Nicole Albern besonderer Dank, für das Zusammenschneiden der OceanRAIN Daten und das mehrfache Verändern und Validieren dieser nach meinen Wünschen.

Dank gilt meinen Kommilitonen Christiane Duscha, Christioph Sauter, Matthias Retsch und Maximilian Schaper für konstruktive und entspannte Flurgespräche, Korrekturlesen und die ständige Anregung zum Konsum koffeinhaltiger Erfrischungsgetränke.

Ebenfalls danken möchte ich Elina Plesca, Lucas Kluft, Manfred Brath und Oliver Lemke für konstruktive Hilfe bei Programmierungsdetails.

In gleicher Weise möchte ich jedem Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Strahlung und Fernerkundung“ der Universität Hamburg für die vielen hilfreichen Kommentare während den Arbeitsgruppensitzungen danken.

Ein herzliches Dankeschön geht ebenfalls an Felix Kolesch, für seine Tipps zur Visualisierung.

Insbesondere danke ich meinen Eltern für die fortlaufenden Kommentierung meiner Arbeit.

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Bachelor-Arbeit „OceanRAIN Niederschlagsstatistik, Eine Analyse der Klimazonen des Atlantischen Ozeans“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.
Mir ist bewusst, dass wahrheitswidrige Angaben als Täuschungsversuch behandelt werden und dass bei einem Täuschungsverdacht sämtliche Verfahren der Plagiatserkennung angewandt werden können. Ich versichere, dass die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem beigefügten Medium gespeicherten Fassung entspricht.

Hamburg, den 28.12.2015

(Marvin Kähnert)