

Beiträge zur Messung des in der Atmosphäre gestreuten Sonnenlichtes

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades des
Doktors der Naturwissenschaften
am Fachbereich für Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Thomas Ruhtz

Berlin, 2009

-
1. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Fischer
 2. Gutachter: Prof. Dr. Ralf Bennartz

Supervisor: Prof. Dr. Jürgen Fischer
Co-Supervisor: Dr. Rene Preusker

Tag der Disputation: 7. 1. 2010

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Thomas Ruhtz, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	5
Abstract (engl.).....	6
1. Einleitung.....	7
2. Beschreibung des polarisierten Lichtes.....	12
2.1. Entwicklung der Polarisationsmessung.....	12
2.2. Die Messung des polarisierten Lichtes	18
3. Das gestreute Licht in der Atmosphäre.....	28
4. Anwendungsbereiche zur Messung des gestreuten Lichtes.....	32
5. Entwicklung eines Systems zur Messung des gestreuten Sonnenlichtes.....	36
5.1. Umsetzung und technische Spezifikationen.....	43
5.2. FUBISS.....	45
5.3. FUBISS-ASA1	48
5.4. FUBISS-POLAR.....	52
5.4.1. Die Dunkelstrom-Messung (DC-Kalibration).....	62
5.4.2. Die Wellenlängen-Kalibration.....	63
5.4.3. Bestimmung der spektralen Detektor-Empfindlichkeit.....	64
5.4.4. Bestimmung der Polarisations-Kalibrationsfaktoren.....	65
5.5. FUBISS-ASA2.....	72
5.6. FUBISS-Zenith.....	74
5.7. URMS (Universal Radiation Measurement System).....	75
5.8. AMSSP (Airborne Multi-Spectral Sunphoto- and Polarimeter).....	87
6. Erste Messungen mit AMSSP-EM.....	89
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	94
8. Anhang.....	95
8.1. Kurzfassung der Historie.....	96
8.2. Referenzen.....	101
8.3. Abkürzungsverzeichnis.....	111
9. Danksagung.....	112
10. Lebenslauf (CV).....	113

Kurzfassung

Beiträge zur Messung des in der Atmosphäre gestreuten Sonnenlichtes

Diese Arbeit beschreibt Systeme zur Messung des in der Atmosphäre der Erde gestreuten Sonnenlichtes. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hier auf die Messung der Polarisations-eigenschaften des gestreuten Lichtes, da dies ein bisher wenig genutztes Potential zur Charakterisierung der Streuer hat. In den ersten Kapiteln wird eine Motivation zu den möglichen Einsatzgebieten dieser Messungen gegeben. Es folgen theoretische Grundlagen von polarisiertem Licht und eine chronologische Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Messsysteme. Die hierzu verwendeten optischen Instrumente können sowohl bodengestützt, als auch vom Flugzeug aus eingesetzt werden. Sie bauen auf ein modulares Multi-Sensor System auf und ermöglichen eine flexible Anpassung an die fortschreitenden und immer komplexer werdenden Anforderungen wissenschaftlicher Zielsetzungen im Themenbereich der optischen Fernerkundung. Abschließend werden beispielhaft Messungen präsentiert, die das Potential der entwickelten Instrumente demonstrieren. Insbesondere die Messung der zirkularen Polarisation ermöglicht nun die Untersuchung von Effekten, die so bisher nicht möglich war.

Abstract (engl.)

Contributions to the measurements of the scattered Sunlight in the atmosphere

This work describes contributions to the measurements of the scattered sun light in the earth atmosphere. A focus will be the measurement of the polarization properties of scattered light. This will have a high potential impact to improve the characterization of the light scattering particles within the atmosphere. After a short theoretical background a number of chronological sorted instrumental developments are described. The instrumentation can be used ground based and airborne. These Instruments are based on a modular multi sensor system which made it possible to follow and adapt them to the preceding and growing complexity of scientific objectives in the field of optical remote sensing. The different steps in this developments will be described and finally let to an universal radiation measurement system and an airborne multi-directional, multi-spectral polarimeter. This work will present examples of measurements and will give an outlook on what kind of applications will be possible in particular with the measurement of circular polarisation properties in future.

1. Einleitung

Die Messung, Analyse und Interpretation des in der Atmosphäre gestreuten Sonnenlichtes einschließlich der Polarisierung erlaubt eine genaue Charakterisierung der Atmosphäre. Der nur schwer abschätzbare Einfluss der in der Atmosphäre enthaltenen Wolken und Aerosole auf das Klima erzeugt zur Zeit große Unsicherheiten in der Klimamodellierung und ist somit ein aktuelles Thema in der Klimaforschung (IPCC 2007). Aerosole und Wolken können auf verschiedene Weise direkt und indirekt den Strahlungshaushalt der Atmosphäre beeinflussen. Das in die Atmosphäre eingestrahlte Sonnenlicht wird an ihnen winkelabhängig reflektiert und zum Teil auch absorbiert. Änderungen der in einer Wolke befindlichen Teilchen haben so einen Einfluss auf den Lebenszyklus und die Bildung von Wolken (Abbildung 1.1).

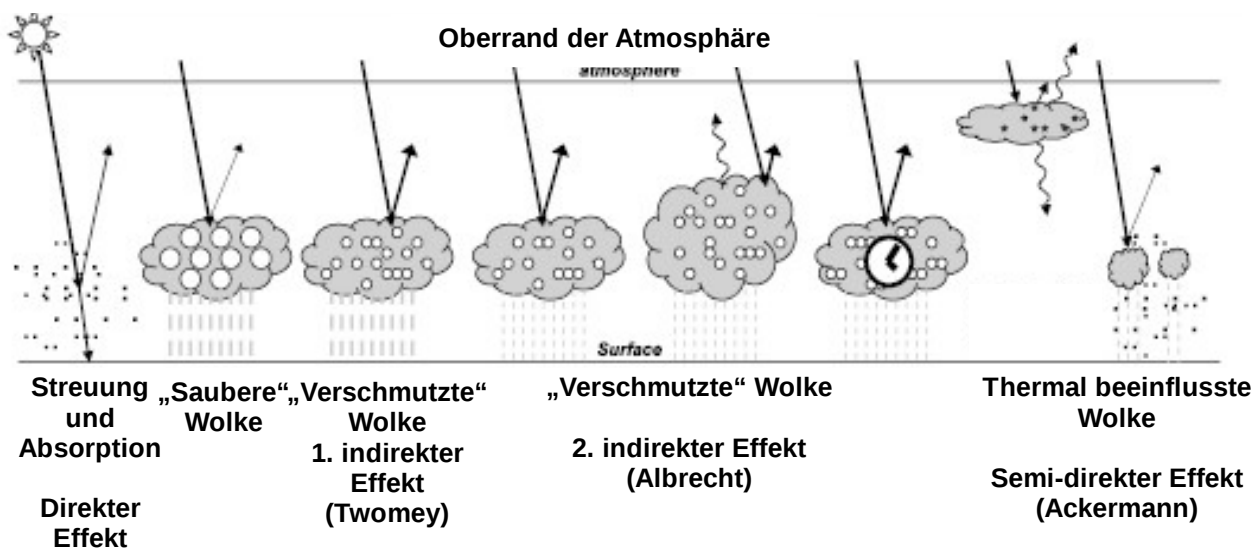


Abbildung 1.1: Die Abbildung zeigt beispielhaft die z.Z. diskutierten Einflüsse von Aerosolen und Wolken auf das Klima (Haywood & Boucher 2000).

Etwa die Hälfte der kurzwelligigen Strahlung der Sonne wird in der Atmosphäre gestreut. Davon wird etwa die Hälfte wieder aus der Atmosphäre heraus reflektiert und nur etwa 20 % der gestreuten Strahlung kommt am Erdboden an (Abbildung

1.2). Jede Änderung dieses Gleichgewichtes hat somit einen Einfluss auf die Energiebilanz der Erde, und Aerosole und Wolken spielen hier eine entscheidende Rolle .

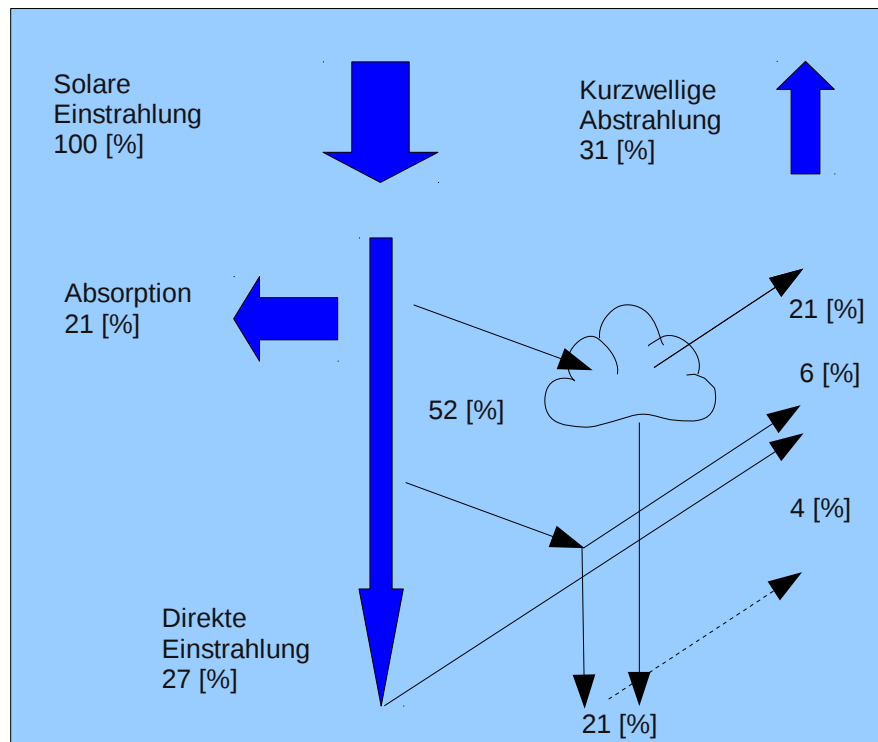


Abbildung 1.2: Die Abbildung zeigt die prozentuale Verteilung der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung (ermittelt aus IPCC 2007).

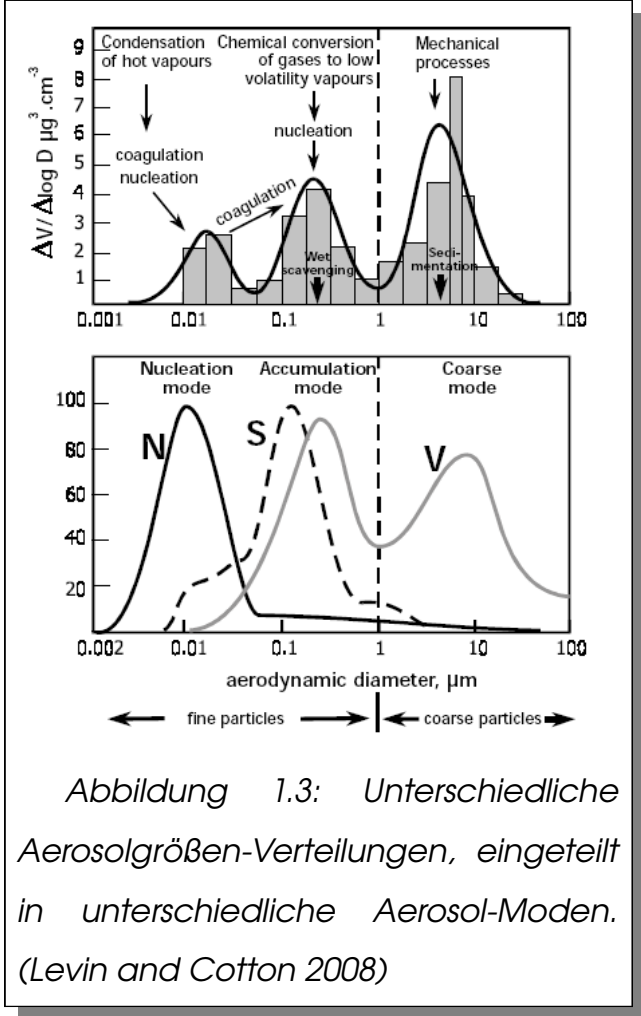
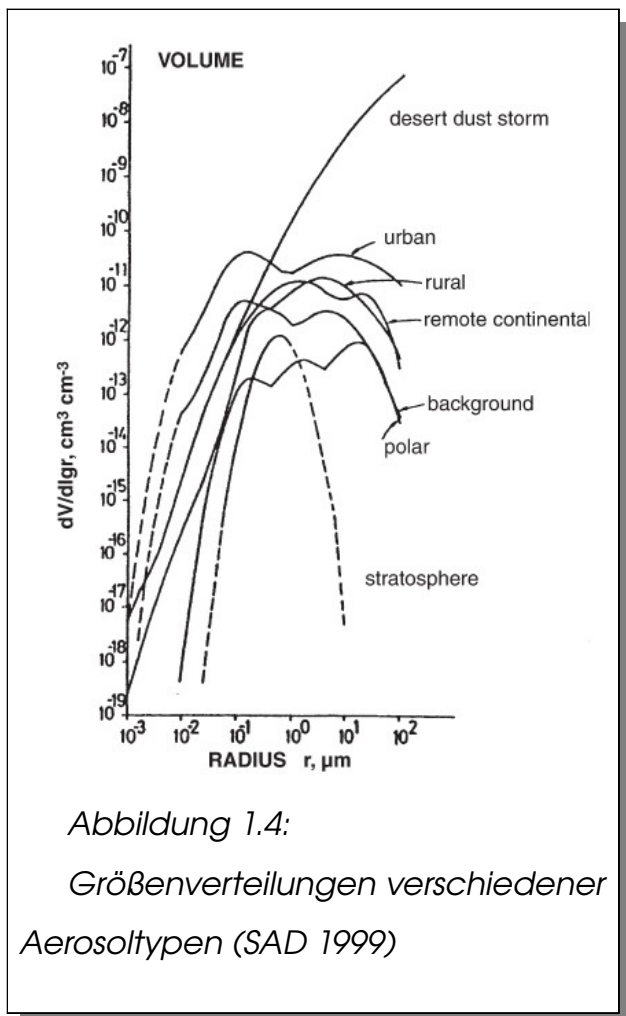
Um umgekehrt mit Hilfe von optischen Messungen auf die in der Atmosphäre enthaltenen Aerosole schließen zu können, sind also Informationen über deren Streueigenschaften von zentraler Bedeutung. Die Streueigenschaften sind vom Winkel, den Materialeigenschaften, der Form und von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig. Möchte man aus optischen Strahlungsmessungen auf die Streu- und Materialeigenschaften und der Form der in der Atmosphäre enthaltenen Teilchen schließen, so benötigt man eine vollständige Beschreibung der Veränderung der Strahlungseigenschaften des Lichtes beim Durchgang durch dieses Medium.

Diese können, wie in Kapitel 2 erläutert wird, mit Hilfe von Stokes-Vektoren und Müller-Matrizen beschrieben werden. Der Stokes-Vektor beschreibt die Selbstkorrelation des Lichtes durch die Parameter Intensität und Polarisierung. Die Müller-Matrizen beschreiben, wie die Intensität und die Polarisierungseigenschaften des einfallenden Lichtes im Medium verändert werden. Es existieren die verschiedensten Modelle um diese Interaktion von Licht mit einem Medium zu beschreiben. Für die Simulation der Streuung an Teilchen deutlich kleiner der Wellenlänge des Lichtes wird in der Regel das Modell der Rayleigh-Streuung angenommen. Für sphärische Teilchen im Bereich der Wellenlänge wird in der Regel die Mie-Streuung angenommen (Mie 1908). Für die Streuung an nicht sphärischen Teilchen kann z.B. die T-Matrix Methode verwendet werden (Mishchenko et al. 2006).

Der Strahlungstransport in einer Modellatmosphäre mit mehreren Plan-parallelen oder auch sphärischen Schichten ist ein sehr breites Forschungsgebiet und es existieren die verschiedensten Modelle, um diesen Strahlungstransport zu simulieren. Einen entscheidenden Einfluss haben die Form, Anzahl und innere Zusammensetzung der in ihr enthaltenen Teilchen. In den verschiedenen Modellen werden die Streueigenschaften der Teilchen unterschiedlich genau wiedergegeben. So betrachten z.B. einfachere Modelle nur isotrope und komplexere die Streuung an nicht-sphärischen Teilchen. Zusätzlich kommen in der Atmosphäre die verschiedensten Teilchengrößen und Verteilungen vor.

Typische Aerosol-Größenverteilungen für unterschiedliche Herkunftstypen zeigt Abbildung 1.4. Neben den Wüstenaerosolen zeigen die städtischen (*Urban*) Aerosole die größten Volumenkonzentrationen von 10^{-11} - 10^{-10} ($dV/dl_{gr} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Kontinentale Aerosole (*Rural*) zeigen etwa 10^{-11} und das Hintergrundaerosol zwischen 10^{-12} - 10^{-11} ($dV/dl_{gr} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (SAD 1999). Abbildung 1.3 zeigt unterschiedliche Aerosolgrößenverteilungen unterschiedlicher Größenklassen (Modentypen) (Levin and Cotton 2008). In Abhängigkeit ihrer Größe werden sie

unterschieden in Nucleation- (bis 10nm), Aitken- (bis 100nm), Accumulation- (bis 1µm) und Coarse-Mode (bis 10µm).



In dieser Arbeit wird als Schwerpunkt die Entwicklung von Instrumenten zur Messung, der in der Atmosphäre gestreuten elektromagnetischen Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarot behandelt. In diesem Spektralbereich können große Anteile der passiv messbaren Eigenschaften der Atmosphäre und der darin enthaltenen Aerosole und Gase sowie der Erdoberfläche erfasst werden. Es wird eine Beschreibung des heutigen Wissensstandes in Bezug auf die technischen Möglichkeiten der Messtechnik gegeben. Es wird erläutert wie das Licht der Sonne in der Atmosphäre gestreut und die Eigenschaften des Lichtes und hier insbesondere die Polarisations-eigenschaften mit neu entwickelten Strahlungsmessgeräten gemessen und charakterisiert werden können. Der

Vergleich und die Kombination unterschiedlicher Messverfahren (Dobovik & King 2000) hat Messunsicherheiten verkleinern können und zu einer besseren Charakterisierung von Aerosol-Parametern geführt. Trotzdem werden immer noch systematische Abweichungen in der Bestimmung der Extinktion der Atmosphäre von 15-20% im sichtbaren festgestellt (Schmid 2006). Diese Arbeit beschreibt einen Weg, diese Unsicherheiten unter Einbindung der richtungsabhängigen Messung der Polarisations-eigenschaften des gestreuten Sonnenlichtes zu verkleinern und in Zukunft neue Anwendungsbereiche zu erschließen.

2. Beschreibung des polarisierten Lichtes

2.1. Entwicklung der Polarisationsmessung

Eine wesentliche Eigenschaft des Lichtes ist die Polarisation. Als einer der ersten beschrieb Bartolinus 1669 wissenschaftlich die optischen Eigenschaften des isländischen Kalkspatkristalls. Gefolgt von Huygens, der um 1689 die Doppelbrechung an diesen Kristallen beschrieb. Die Doppelbrechung in diesen Kristallen entsteht durch eine von der Polarisation des einfallenden Lichtes abhängigen Brechzahl des Kristalls. Somit kann dieser Kristall, Licht entlang seiner optischen Achse in zwei Teilstrahlen mit unterschiedlichen Polarisationsrichtungen aufteilen. Historisch betrachtet wurden die Polarisations-eigenschaften des Lichtes vermutlich schon von den Wikingern etwa im Jahre 800 entdeckt (Ramskou 1969, Können 1985, Hegedüs et al. 2007). Ramskou vertrat in seinem Buch die These, dass die Wikingern mit einem so genannten Sonnenstein selbst bei Nebel oder dünnen Wolken auf See die Position der Sonne ermitteln konnten. Sie hatten so eine Möglichkeit zur Navigation selbst bei schwierigen Wetterbedingungen. Dieser so genannte Sonnenstein galt als magischer Stein und bestand aus einem in Island vorkommenden Kalkspatkristall. Außer dieser frühen Anwendung der Polarisations-eigenschaften des Lichtes, blieb es jedoch sehr lange verborgen, was es mit den für damalige Verhältnisse geheimnisvollen Effekten dieser polarisierenden Kristalle auf sich hat. Bis in das 18. Jahrhundert hinein gab es mit den Eigenschaften des Lichtes und der Polarisation nicht viele Fortschritte und es blieb in dieser Zeit auch lange unklar, ob man sich das Licht als Welle (Huygens 1690) oder als Teilchen (Newton 1704) vorzustellen hat oder zu beschreiben ist.

Erst Anfang des 19. Jahrhunderts nahmen die Entdeckungen um die Eigenschaften des Lichtes, durch die zunehmende Korrespondenz und den Diskussionen zwischen den einzelnen Wissenschaftlern stetig zu. Ein Beispiel für diese Diskussionen sind die zu großen Teilen vorhandenen Briefe von William Henry Fox Talbot (1800-1877). Dieser sammelte in seiner aktiven wissenschaftlichen Zeit über

10.000 Briefe, die er von den mit ihm in Verbindung stehenden ca. 1100 Einzelpersonen erhielt. Darunter fallen bekannte Namen wie Dominique Francois Jean Arago (1786-1853), der 1809 als Erster das teil polarisierte gestreute Licht der Sonne in der Atmosphäre beschrieb. Er entdeckte einen neutralen Punkt am Himmel an dem das Licht unpolarisiert ist und in Abhängigkeit zur Sonne seine Position änderte. Ein weiterer bekannter Wissenschaftler war Thomas Young, der die Welleneigenschaften des Lichtes beschrieb und als erster durch seine am Doppelspalt durchgeführten Experimente die Welleneigenschaften des Lichtes nachgewiesen hat. Ein weiterer sehr bekannter Briefkontakt war David Brewster, der durch seine Experimente an spiegelnden Oberflächen (1815) unter einem bestimmten Winkel die vollständige Polarisierung des einfallenden Lichtes feststellte. Ebenso dazu gehörte Michael Faraday (1791-1867), der durch seine Verbindung zu Thomson, dem späteren Lord Kelvin und dessen Wissen über die Veröffentlichung von Green, die Verbindung der Welleneigenschaften des Lichtes mit denen des magnetischen Feldes erkannte. Er legte somit die Grundlagen für die Arbeiten von James Clerk Maxwell (1831-1879) und seine nach ihm benannten maxwellschen Gleichungen. Nach dieser von Talbot initiierten und selbst nach heutiger Sicht recht einmaligen Korrespondenz und dem Austausch wissenschaftlicher Erkenntnisse, folgten hauptsächlich die in der näheren Vergangenheit und im weiteren beschriebenen Untersuchungen.

Die Veröffentlichungen von van der Hulst (1952) zur Streuung in der Atmosphäre und von Chandrasekhar (1960) legten, mit Hilfe des von Stokes (1852) entwickelten und nach ihm benannten Stokes-Vektor Formalismus, die Grundlagen für heutige Modellrechnungen zum Strahlungstransport in der Atmosphäre unter Einbeziehung der Polarisierung. Weitere Arbeiten in diese Richtung waren z.B. die von Sekara (1967), der eine Verbindung von Polarisierungsgraden in Nadir-Richtung zur optischen Dicke herstellte. Auch Sagan und Pollack (1969) zeigten im Anhang zu Ihrer Veröffentlichung den Zusammenhang von Polarisierung und dem Wolkenoberkantendruck für eine Modellatmosphäre. Coulson (1971) untersuchte

die Polarisations-eigenschaften der gestreuten Strahlung in der Atmosphäre und stellte z.B. Verschiebungen der neutralen Punkte an unterschiedlich dunstigen Tagen fest. In der Astronomie wurden zu dieser Zeit signifikante Quellen für zirkulare Polarisation in weißen Zwergen festgestellt (Gehrels 1973) und darauf geschlossen, dass diese durch starke Magnetfelder hervorgerufen werden.

Als einer der ersten führten Prosch et al. (1983) Messungen mit einem bildgebenden Polarimeter vom Flugzeug aus durch. Dabei wurden die Polarisations-eigenschaften des in der Atmosphäre und an der Wasseroberfläche gestreuten Sonnenlichtes untersucht. Sie schlugen desweiteren diese Art der Messungen für Satelliten vor. Sie argumentierten, dass dies den entscheidenden Vorteil der relativen Messung gegenüber der Messung der Intensität mit aufwändiger radiometrischer Kalibration hätte. Sie wiesen auch darauf hin, dass die Polarisation nicht nur von den Eigenschaften der Atmosphäre, sondern auch von der Rauigkeit des Erdbodens oder auch den Windgeschwindigkeiten über Wasseroberflächen abhängen.

In sehr klaren Atmosphären kann das Licht in bestimmte Richtungen nahezu vollständig linear polarisiert sein (Coulson 1988). Die lineare Polarisation hängt in dieser nach Rayleigh benannten Atmosphäre hauptsächlich von der optischen Dicke und den darin enthaltenen Molekülen ab. Im Gegensatz zu dieser durch Einfachreflektion an Molekülen hoch linear polarisierten Atmosphäre, hat eine sehr trübe oder stark bewölkte Atmosphäre nur noch Polarisationsgrade von wenigen Prozent. Es existieren in der Rayleigh-Atmosphäre neutrale Punkte an denen der Polarisationsgrad gegen Null geht. Die neutralen Punkte werden ausführlich von Coulson (1988) und die Theorie zur Rayleigh-Atmosphäre von Chandrasekhar (1960) diskutiert und beschrieben. Ein schwer zu beobachtender neutraler Punkt wurde erst 2002 (Horvath et al. 2002) nachgewiesen. Dieser liegt mit der Sonne im Rücken, in horizontaler Blickrichtung, unterhalb der Horizontlinie und kann daher nur aus größerer Höhe betrachtet werden.

Andere Phänomene bei denen die Polarisation eine große Rolle spielt sind z.B. Reflektionen an der Wasseroberfläche und auch unter Wasser. So ist ein Beobachter unter Wasser von einer Polarisationsphäre, dem sogenannten „Snell window“ umgeben (Horvath & Varju 2004). Je nach Sonnenstand ändert sich die Lage des maximalen Polarisationsgrades unter Wasser. Auch bei Wolken und völlig bedeckten Himmel kann aufgrund des gestreuten Lichtes an den Wassermolekülen und an Algen bzw. Phytoplankton, eine Polarisation des Lichtes unter Wasser gemessen werden. So beschreiben z.B. Volten et al. (1998) in ihrem Artikel die Streufunktionen von 15 verschiedenen Phytoplanktonarten.

Seltener vorkommende Phänomene bei denen ungewöhnlich polarisiertes Licht beobachtet werden kann, sind Regenbogen und Halos (Coulson 1988). Regenbogen entstehen durch Reflektion der Sonnenstrahlen an Regentropfen, währenddessen Halos hauptsächlich durch Reflektion an Eiskristallen oder Wolkentröpfchen entstehen. Weniger bekannt ist bei dieser Art der Phänomene die Glorie. Sie entsteht z.B. im Rückwärtsstreubereich über Wolken. Vom Flugzeug aus betrachtet, kann man sie über einer geschlossene Wolkendecke, um den Schatten des Flugzeuges herum, mit der Sonne im Rücken leicht beobachten. Dies kann unter anderem zur Ermittlung des Wolkentröpfchenradius dienen (Mayer et al. 2004).

Auch in der Tierwelt spielt das Ausnutzen der Polarisation eine Rolle und ist in manchen Fällen schon nachgewiesen. Bekannte Beispiele sind z.B. das Navigieren von Bienen (Fritsch 1967) und Ameisen mit Hilfe des polarisierten Himmelslichtes (Horvath & Varju 2004). Auch zirkular polarisiertes Licht kommt in der Natur vor. So können z.B. einige Käferarten mit einer metallischen Oberhaut selektiv rechts oder links zirkular polarisiertes Licht reflektieren. Feuerfliegenlarven können indes zirkular polarisiertes Licht aussenden. Zirkular polarisiertes Licht spielt je nach Lichteinfall unter Wasser (Horvath & Varju 2004) und im Zusammenhang mit der „Water leaving

radiance“ eine Rolle (Chowdhary et al. 2002). Unter bestimmten Umständen kann die Annahme einer Lambertschen (isotrop streuenden) Wasseroberfläche, je nach Beobachtungswinkel, zu Messfehlern führen und muss durch ein Modell mit rauer Wasseroberfläche ersetzt werden. Coulson (1988) gibt an, dass bei der Absorption und Streuung durch Partikel elliptisch oder zirkular polarisiertes Licht entstehen kann.

Die vorher beschriebenen historischen Erkenntnisse und Untersuchungen zu den Polarisations-eigenschaften des Lichtes in der Atmosphäre wurden zeitlich punktuell immer wieder aufgenommen. Diese blieben aber häufig, aufgrund der unzureichenden Auswertungsmöglichkeiten oder technischen Schwierigkeiten unklar und messtechnisch sehr aufwendig. Die großen Fortschritte der letzten Jahrzehnte in der Computertechnik ermöglichen nun immer umfangreichere Modellrechnungen und Simulationen. Zusätzlich ermöglicht das Miniaturisieren in Bereichen der Optik, Elektronik und Mechanik immer kleinere Messgeräte. Als Beispiel kann hier die Entwicklung Kamertechnik angeführt werden. Frühere auf chemischer Basis hergestellte Bildaufnahmen wurden abgelöst durch Digitaltechniken. Damit können z.B. Bildreihen in sehr hoher zeitlicher wie auch spektraler Auflösung aufgenommen werden. Die so immer kleiner und komplexer werdenden Messgeräte, mit denen simultan eine große Anzahl von Messungen durchgeführt und gespeichert werden können, werden zur Validierung von Modellrechnungen herangezogen. Die computergesteuerte Messtechnik macht es heute möglich, sich immer wiederholende Vorgänge präzise mit einer zeitlich sehr genauen Wiederholrate über lange Zeiträume autonom durchzuführen. Die auf Satelliten eingesetzten Instrumente wie z.B. Gome oder Polder ermöglichen globale Zeitserien. Die Auswertelgorithmen (z.B. Veefkind 1999, Heinemann 2000, Hermann et al. 2005) und die aus operationellen Satelliten erzeugten Zeitserien von klimatologischen Parametern führen zu neuen Erkenntnissen in der Erforschung der Klimaentwicklung und deren Zusammenhänge für Abschätzungen zukünftiger Entwicklungen. Auch die präzise zu einem bestimmten Zeitpunkt durchgeführte

lokale Einzelmessung führt durch Vergleich mit anderen gleichzeitig durchgeführten Messungen zu einem besseren Verständnis der elementaren Zusammenhänge in der Natur. So werden z.B. mit Flugzeugmesskampagnen lokale atmosphärische Phänomene genauer untersucht und mit Satellitenmessverfahren verglichen und validiert.

2.2. Die Messung des polarisierten Lichtes

Licht wird klassisch als elektromagnetisches Vektorfeld beschrieben. Maxwell formulierte 1861 Gleichungen zur Lösung des Vektorfeldes und diese können in differenzieller Schreibweise (mit Laplace-Operator ∇) in SI Einheiten dargestellt werden. (Die folgenden Definitionen können durch Umformung mit Hilfe der Integralsätze von Gauß und Stokes auch in integraler Form dargestellt werden. Der Vektor \vec{r} entspricht den räumlichen Koordinaten)

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \quad (2.1)$$

\vec{D} ist die dielektrische Verschiebung. Die Ladungsdichte ρ ist die Quelle des elektrischen Feldes. Für das Vakuum verschwindet diese.

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2.2)$$

Das Feld der magnetische Flußdichte \vec{B} ist quellenfrei. Daraus folgt u.a., dass es keine magnetischen Monopole gibt.

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

Jede zeitliche Änderung des magnetischen Feldes \vec{B} führt zu einem elektrischen Gegenfeld \vec{E} (Induktionsgesetz).

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{j}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Jede zeitliche Änderung der dielektrischen Verschiebung \vec{D} und/oder einer Ladungsstromdichte \vec{j} führt zu einem magnetischen Wirbel (Ampere'sches

Gesetz).

Aus den vorher genannten Gleichungen lassen sich unter der Annahme eines Vakuums und Umformung mit Integralsätzen folgende Wellengleichungen herleiten:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{H}(\vec{r}, t) \quad (2.6)$$

Mit dem elektrischen Feldvektor \vec{E} , dem magnetischen Feldvektor \vec{H} und mit der Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle v . Diese Formeln gelten unter der Annahme einer Region frei von Strömen und Ladungen in einem homogenen isotropischen Medium. Für die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle durch dieses Medium gilt

$$v^2 = \frac{c^2}{\epsilon \mu} \quad (2.7)$$

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.8)$$

mit der magnetischen Permeabilität μ , der Dielektrizitätskonstante ϵ , dem komplexen Brechungsindex n , der Phasengeschwindigkeit v und der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c .

Eine monochromatische elektromagnetische Welle

$$\vec{E}(r, t) = E_0 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t) \quad (2.9)$$

ist eine mögliche Lösung der Wellengleichung (2.5). Mit der Amplitude E_0 , dem Wellenvektor k , der Wellenlänge $\lambda=1/k$ und ω der Kreisfrequenz. Es gilt $\lambda \cdot f=c$ und

$$k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad (2.10)$$

Die Eigenschaften eines Lichtstrahles, also die Amplitude, Frequenz, Ausbreitungsrichtung und Polarisation können nach Chandrasekhar (1951) mit dem Stokes-Vektor beschrieben werden.

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1(t) E_1^*(t) + E_2(t) E_2^*(t) \\ E_1(t) E_1^*(t) - E_2(t) E_2^*(t) \\ E_1(t) E_2^*(t) + E_2(t) E_1^*(t) \\ i(E_1(t) E_2^*(t) - E_2(t) E_1^*(t)) \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

E_1 und E_2 stellen die Komponenten und $E_1^*(t)$ bzw. $E_2^*(t)$ stellen die konjugiert komplexen Komponenten des komplexen elektrischen Vektors \vec{E} dar. Die Komponenten (I , Q , U , V) des Stokes-Vektor können wie folgt interpretiert werden:

I : Intensität der elektromagnetischen Welle

Q, U : linearer Polarisationsanteil

V : zirkularer Polarisationsanteil

Dieser ist definiert in einem rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem für zeitharmonische monochromatische planparallele elektromagnetische Wellen in einem homogenen isotropischen Medium.

Mit

$$I \equiv \kappa(C_{11}+C_{22}) = \kappa((\mathbf{a}_1)^2+(\mathbf{a}_2)^2) \quad (2.12a)$$

$$Q \equiv \kappa(C_{11}-C_{22}) = \kappa((\mathbf{a}_1)^2-(\mathbf{a}_2)^2) \quad (2.12b)$$

$$U \equiv \kappa(C_{12}+C_{21}) = 2\kappa(\mathbf{a}_1\mathbf{a}_2+\mathbf{a}_2\mathbf{a}_1) \cos \delta \quad (2.12c)$$

$$V \equiv i\kappa(C_{11}-C_{22}) = 2\kappa(\mathbf{a}_1\mathbf{a}_2-\mathbf{a}_2\mathbf{a}_1) \sin \delta \quad (2.12d)$$

und κ als dimensionsgebende Konstante zur Transformation des Stokes-Vektors in Intensitätseinheiten und \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 , δ als Koeffizienten aus der planparallelen Wellengleichung kann man schreiben

$$C = \frac{1}{2\kappa} \begin{pmatrix} I+Q & U+iV \\ U-iV & I-Q \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Mit Hilfe der Pauli-Matrizen

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

kann man schreiben

$$C = \frac{1}{2\kappa} (I\sigma_0+Q\sigma_1+U\sigma_2+V\sigma_3) \quad (2.15)$$

Mit $\det(C) = 0$ kann man sehen, dass

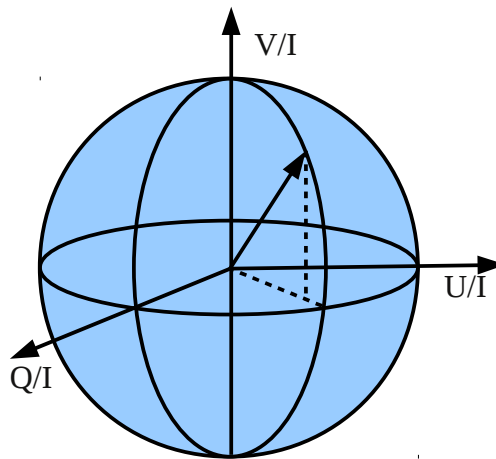
$$I^2-Q^2-U^2-V^2 = 0 \quad (2.16)$$

Umgeformt lässt sich dies als Flächengleichung darstellen

$$\frac{Q^2}{I^2} + \frac{U^2}{I^2} + \frac{V^2}{I^2} = 1 \quad (2.17)$$

Dies repräsentiert eine Sphäre mit dem Radius=1. Diese Sphäre wird Poincare-Sphäre genannt. Jeder Punkt auf der Oberfläche der Sphäre repräsentiert einen vollständig polarisierten Zustand eines monochromatischen Lichtstrahls. Folgendes Bild zeigt eine Poincare-Sphäre

Bild Poincare-Sphäre:



Aus einem Satz von vier Stokes Parametern kann ein Polarisations-Vektor definiert werden

$$p \equiv \left(\frac{Q}{I}, \frac{U}{I}, \frac{V}{I} \right)^T \quad (2.18)$$

Da p zur Poincare-Sphäre gehört, folgt

$$0 \leq P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \leq 1 \quad (2.19)$$

Die Norm des Polarisations-Vektors entspricht dem Grad der Polarisation (DOP: *Degree Of Polarization*) angeben:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2.20)$$

Der Grad der linearen Polarisation (DOLP: *Degree Of Linear Polarization*):

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2.21)$$

Detektoren für den sichtbaren und nahen Infrarot Bereich können im allgemeinen nur die spezifische Intensität I_ν einer transportierten Strahlungsenergie dE_ν detektieren. Diese wird definiert über die (spezifische) Intensität, durch eine Fläche $d\sigma$, einem bestimmten Wellenlängenbereich $d\nu$, einem festen Winkelbereich $d\omega$ und gemessen über einen gewissen Zeitraum. Es ergibt sich damit folgende Formel:

$$dE_\nu = I_\nu d\nu d\sigma d\omega dt \quad (2.22)$$

oder falls der Strahl aus nicht orthogonaler Richtung zur Fläche $d\sigma$ Ein- bzw. Austritt:

$$dE_\nu = I_\nu \cos\vartheta d\nu d\sigma d\omega dt \quad (2.23)$$

In SI Einheiten wird die spezifische Intensität oder auch Strahldichte (engl. Radiance) in (W / Hz m² sr) angegeben.

Optische Systeme lassen sich durch Transformation eines Stokes-Vektors mit Müller-Matrizen beschreiben.

Der Stokes-Vektor kann mit einer reellen 4x4 Matrix in der Form

$$\vec{S}' = M \vec{S} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

transformiert werden. Eine Rotations-Matrix, die die Rotation des Bezugssystems um einen Winkel α beschreibt, hat folgende Form

$$M(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Zur Messung des vollen Stokes-Vektors werden zwei optische Komponenten (Iniesta 2003, Mishchenko 2006) benötigt. Mit der folgenden Matrix kann die Interaktion der elektromagnetischen Welle mit optischen Komponenten oder Medien angegeben werden. So kann z.B. der Effekt eines idealen Polarisators mit der Müller-Matrix

$$M_p(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

beschrieben werden.

Für einen Polarisator, der nur partiell polarisiert, wird eine Müller-Matrix von Iniesta (2003) angegeben.

Die zweite optische Komponente transmittiert Licht mit unterschiedlicher

Geschwindigkeit parallel und senkrecht zu einer ausgezeichneten Achse und wird Verzögerungsplatte (*Retarder*) genannt

$$M_R(\alpha, \delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^2 + s_2^2 \cos \delta & c_2 s_2 (1 - \cos \delta) & -s_2 \sin \delta \\ 0 & c_2 s_2 (1 - \cos \delta) & s_2^2 + c_2^2 \cos \delta & c_2 \sin \delta \\ 0 & s_2 \sin \delta & -c_2 \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Diese Matrix entspricht einer Dreh-Matrix und erzeugt demnach eine Drehung auf der Poincare-Sphäre mit $c_2 = \cos 2\alpha$ und $s_2 = \sin 2\alpha$. Ausgehend von dem vorher definierten Koordinatensystem entspricht sie einer Drehung um die X und Y-Achse um den Winkel α und einer Phasenverschiebung von z.B. $\delta = +\pi/2$.

Kombiniert man Polarisator und Verzögerungsplatte so erhält man

$$\vec{S}' = M(\alpha)_P M(\alpha, \delta)_R \vec{S} \quad (2.28)$$

Die hier gezeigten Gleichungen stellen nur ein Beispiel für die möglichen Winkelstellungen für Polarisator und Verzögerungsplatte dar. Am Ausgang eines solchen Filters ergibt sich der resultierende Vektor wie folgt

$$E'_x = E_x \cos \alpha, \quad E'_y = E_y \sin \alpha \quad (2.29)$$

mit δ als Verzögerung der Verzögerungsplatte, mit

$$E'_x = E_x, \quad E'_y = E_y e^{i\delta} \quad (2.30)$$

ergibt sich folgende resultierende Gleichung

$$E_\alpha(t, \delta) = E_x \cos \alpha + E_y \sin \alpha e^{i\delta} \quad (2.31)$$

Die Intensität des Strahls, nach Durchgang durch die beiden optischen Komponenten Polarisator und Verzögerungsplatte, ergibt sich aus

$$I_{meas}(\alpha, \delta) = \langle E_{\alpha}(t, \delta) E_{\alpha}^*(t, \delta) \rangle \quad (2.32)$$

und den Definitionen des Stokes-Vektors

$$\langle E_x E_x^* \rangle = \left(\frac{1}{2}\right)(I + Q) \quad (2.33a)$$

$$\langle E_y E_y^* \rangle = \left(\frac{1}{2}\right)(I - Q) \quad (2.33b)$$

$$\langle E_x E_y^* \rangle = \left(\frac{1}{2}\right)(U + iV) \quad (2.33c)$$

$$\langle E_x^* E_y \rangle = \left(\frac{1}{2}\right)(I - iV) \quad (2.33d)$$

zu

$$I_{meas}(\alpha, \delta) = \frac{1}{2} \left(I + Q \cos 2\alpha + U \cos \delta \sin 2\alpha + V \sin \delta \sin 2\alpha \right) \quad (2.34)$$

Die Formel 2.34 stellt die Hauptgleichung zur Messung des Stokes-Vektors dar. Diese ist abhängig von der Stellung der beiden optischen Komponenten relativ zu Referenzebene (α) und der Verzögerung der Verzögerungsplatte.

Es gibt 4 Sätze mit Parametern mit denen nach Messungen alle Stokes-Parameter bestimmt werden können.

Eine mögliche Kombination ist:

$$I = I_{meas}(0^\circ, 0^\circ) + I_{meas}(90^\circ, 0^\circ) \quad (2.35a)$$

$$Q = I_{meas}(0^\circ, 0^\circ) - I_{meas}(90^\circ, 0^\circ) \quad (2.35b)$$

$$U = I_{meas}(45^\circ, 0^\circ) - I_{meas}(135^\circ, 0^\circ) = I - 2 I_{meas}(45^\circ, 0^\circ) \quad (2.35c)$$

$$V = I - 2 I_{meas}(45^\circ, 90^\circ) = I_{meas}(45^\circ, 90^\circ) - I_{meas}(135^\circ, 90^\circ) \quad (2.35d)$$

Die zweite Winkelkombination (2.35c, 2.35d) wird in der Literatur z.B. von (Liou 1980) vorgeschlagen.

Die hier gezeigten Formeln gelten nur für den idealen Polarisator und Retarder. Ungenauigkeiten in der Ausrichtung und den spezifischen Eigenschaften der optischen Komponenten müssen berücksichtigt werden. Insbesondere können die jeweiligen Winkel für die einzelnen Stellungen der Polarisatoren und Verzögerungsplatten variiert und optimiert werden. Mögliche Optimierungsmethoden werden von (Tyo 2002) und (Hollstein 2009) vorgestellt. Die spektral variierende Verzögerung der Wellenplatte stellt hier einen Systemparameter dar. Diese muss für den gesamten Spektralbereich bestimmt und mit Hilfe von Optimierungsmethoden eine optimale Winkelstellung für Polarisator und Retarder gefunden werden. Dies führt in der Regel zu Winkeleinstellungen die von den oben beschriebenen Winkeln abweichen. Die Abweichung der Winkelstellung kann im Labor bestimmt werden und in der Berechnung der Stokes-Parameter mit einbezogen werden. Es ändert sich dadurch die Berechnung der einzelnen Parameter (I , Q , U , V) und dies wird in einem späteren Kapitel 5.4.4 für den Fall der Bestimmung des linearen Polarisationsgrades gezeigt.

3. Das gestreute Licht in der Atmosphäre

Nach Hansen & Travis (1974) und Chandrasekhar (1960) kann die Rayleighstreuung, unter der Annahme kugelförmiger Partikel mit folgender Phasenmatrix in Abhängigkeit des Einfallswinkel θ beschrieben werden:

$$P(\theta) = \frac{3}{4} \begin{pmatrix} 1 + \cos^2 \theta & -1 + \cos^2 \theta & 0 & 0 \\ -1 + \cos^2 \theta & 1 + \cos^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die meisten Gasmoleküle in der Atmosphäre sind nicht kugelsymmetrisch und so ergibt sich für die Streuung eine mit einem Depolarisationsfaktor δ leicht veränderte Streu- bzw. Phasenmatrix:

$$P(\theta) = \frac{3}{2} \frac{1-\delta}{1+\delta/2} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{1+\delta}{1-\delta} + \cos^2 \theta \right) & -\frac{1}{2} \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \sin^2 \theta & \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\delta}{1-\delta} \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Es gilt für Streuung an isotropen Teilchen $\delta = 0$ und für anisotrope z.B. nach Penndorf (1957) $\delta = 0.022$ für H_2 , $\delta = 0.0305$ für N_2 , $\delta = 0.06$ für O_2 , $\delta = 0.09$ für CO_2 und $\delta \approx 0.03$ für O_3 ~ 0.06 für Luft.

Die hier beispielhaft gezeigten Einzelstreu-Matrizen eignen sich nur in erster Näherung zur Herleitung der Streueigenschaften einer großen Menge von kleinen Teilchen mit einer spezifischen Größenverteilung. Für größere kugelförmige Teilchen relativ zur Wellenlänge wird in der Regel die Mie-Theory verwendet. Diese hat

folgende Einzelstreu-Matrix (Kokhanovsky 2003, Bohren & Huffman 1983, van der Hulst 1957) und führt multipliziert mit γ zur Phasen-Matrix :

$$\hat{P} = \gamma \begin{pmatrix} \frac{|S_{11}|^2 + |S_{22}|^2}{2} & \frac{|S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{|S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2} & \frac{|S_{11}|^2 + |S_{22}|^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Re(S_{11} S_{22}^X) & \Im(S_{11} S_{22}^X) \\ 0 & 0 & -\Im(S_{11} S_{22}^X) & \Re(S_{11} S_{22}^X) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

mit

$$\gamma = \frac{4\pi}{k^2 C_{sca}} \quad (3.4)$$

und \Re als Real- und \Im als Imaginärteil.

Die Elemente der Amplituden Einzelstreu-Matrizen S_{11} und S_{22} werden angegeben durch folgende Streuamplituden

$$S_{11}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)\} \quad (3.5)$$

$$S_{22}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)\} \quad (3.6)$$

mit

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (3.7)$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{dP_n^{(1)}(\cos\theta)}{d\theta} \quad (3.8)$$

$$a_n = \frac{\psi_n'(y)\psi_n(x) - m\psi(y)'_n(x)}{\psi_n'(y)\xi_n(x) - m\xi(y)'_n(x)} \quad (3.9)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n'(y)\psi_n(x) - \psi(y)'_n(x)}{m\psi_n'(y)\xi_n(x) - \xi(y)'_n(x)} \quad (3.10)$$

und $P_n^{(1)}(\cos\theta)$ als Funktionen von Legendre-Polynomen bzw. deren Ableitungen, Θ als Streuwinkel und m als relativer Refraktionsindex des Partikels. Ψ und ξ repräsentieren mit J und H Bessel- und Hankel-Funktionen:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\left(\pi \frac{x}{2}\right)} J_{n+\frac{1}{2}}(x) \quad (3.11)$$

$$\xi_n(x) = \sqrt{\left(\pi \frac{x}{2}\right)} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(x) \quad (3.12)$$

x ist der Größenparameter abhängig von dem Radius a des Teilchen und der streuenden Wellenlänge λ mit $x=2 a \pi / \lambda$

$$Q_{sca} = \frac{C_{sca}}{\pi a^2} \quad (3.13)$$

Aus den folgenden Streu- und Extinktionseffizienzen

$$Q_{sca} = \frac{C_{sca}}{\pi a^2} \quad (3.14)$$

$$Q_{ext} = \frac{C_{ext}}{\pi a^2} \quad (3.15)$$

und für Lichtstreuung an isotropischen homogenen Kugeln mit

$$Q_{sca}(\theta) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ [a_n]^2 + [b_n]^2 \} \quad (3.16)$$

$$Q_{ext}(\theta) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \Re\{a_n + b_n\} \quad (3.17)$$

berechnen sich die mittleren Streu- und Extinktionsquerschnitte für polydisperse Größenverteilungen $f(a)$:

$$\sigma_{sca} = N \int_0^{\infty} \pi a^2 Q_{sca} f(a) da \quad (3.18)$$

$$\sigma_{ext} = N \int_0^{\infty} \pi a^2 Q_{ext} f(a) da \quad (3.19)$$

und folgender Phasenfunktion und Asymmetrie-Faktor

$$P(\theta) = \frac{2\pi N \int_0^{\infty} (i_1 + i_2) f(a) da}{k^2 \sigma_{sca}} \quad (3.20)$$

$$g = \frac{\int_0^{\infty} a^2 g Q_{sca} f(a) da}{\int_0^{\infty} a^2 Q_{sca} f(a) da} \quad (3.21)$$

mit

$$i_1 = |S_1|^2 \quad i_2 = |S_2|^2$$

4. Anwendungsbereiche zur Messung des gestreuten Lichtes

Das Sonnenlicht wird in der Atmosphäre von Molekülen, Aerosolen und Wolkentröpfchen unterschiedlichster Größe gestreut. Diese Streuprozesse können durch die Messung aller im Licht enthaltenen Informationen untersucht werden. Dazu gehören die Intensität und die Polarisations-eigenschaften des Lichtes in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Streueigenschaften des zu untersuchenden Mediums. Ziel ist es, mit Hilfe der Eigenschaften des Lichtes Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Streuverursacher, z.B. der Aerosole zu gewinnen. Die Polarisation entsteht in der Atmosphäre hauptsächlich durch Streuung des zunächst unpolarisierten Sonnenlichtes an den in der Atmosphäre enthaltenen Teilchen. Die Art und Weise wie das Licht in der Atmosphäre gestreut wird, ist abhängig von der Art und Größe der Teilchen und kann somit zur Charakterisierung dieser Teilchen herangezogen werden. Die Teilchendichte, d.h. die Menge der Teilchen pro Volumeneinheit beeinflusst durch Mehrfachreflexion die Polarisations-eigenschaften des Lichtes.

Im Folgenden werden verschiedene Anwendungsbereiche in denen, die Messung der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung eine Rolle spielen, beschrieben. Ein erster Anwendungsbereich ist die Bestimmung des vom Boden aus gemessenen Aerosols in den darüber liegenden Luftschichten. Aus der Doktorarbeit von Ute Böttger (1997) geht hervor, dass sich der Informationsgehalt einer Strahlungsmessung erhöht, wenn außer der Strahldichte auch andere Eigenschaften des gestreuten Lichtes, wie der Polarisationsgrad, bestimmt werden. Aus Modellberechnungen bzw. Strahlungstransport-Simulationen war in dieser Untersuchung der komplexe Brechungsindex der Atmosphäre die physikalische Größe mit der größten Variabilität. Dieser hängt in einem hohem Maße von den Absorptionseigenschaften der Aerosole ab. Daraus kann auch eine Charakterisierung von Aerosoleigenschaften abgeleitet werden. Des Weiteren geht aus der Arbeit hervor, dass mindestens zwei Messungen aus unterschiedlichen

Wellenlängenbereichen und wenigstens zwei Beobachtungsrichtungen nötig sind, um Aerosoltypen zu unterscheiden. Feinere Unterteilungen eines Typs sind mit Hilfe der Messungen der Polarisationsseigenschaften bzw. des Stokes-Vektors möglich. In der Arbeit wird darauf hingewiesen, dass intensiver Forschungsbedarf im Zusammenhang von Imaginärteil des komplexen Brechungsindex, der Teilchenform und den Absorptionseigenschaften der Aerosole besteht. Auch existieren nur für sehr wenige Oberflächen, wie Schnee oder Wasseroberflächen die vollständigen Reflexionsmatrizen, die nötig sind, um die darüber liegende Atmosphäre zu modellieren. In der Regel werden in diesem Zusammenhang Näherungen oder Vereinfachungen für die Modelle benutzt. Daraus folgt, dass Messungen vom Boden und aus der Luft aus verschiedene Höhen und Richtungen nötig sind, um weitere vollständige Reflektionsmatrizen für die verschiedenen Untergründe zu erhalten. Dies ermöglicht Fortschritte in der Erforschung der Zusammenhänge zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre. Hierfür müssen geeignete Messgeometrien und Verfahrensweisen für die Durchführung der Messungen in der Atmosphäre untersucht und gefunden werden. Ein Ziel ist dabei geeignete Verfahren zu entwickeln, mit denen die Eigenschaften der Erdoberfläche und der darüber befindlichen Atmosphäre vollständig erfasst werden können. Im Folgenden werden verschiedene Teilanwendungsbereiche beispielhaft vorgestellt.

Ein interessanter Anwendungsbereich polarimetrischer Messverfahren sind spektral hoch aufgelöste Messungen in den atmosphärischen Gasabsorptionsbanden, insbesondere die der Sauerstoffbande bei 760 nm (O₂A-Bande). Die O₂A-Bande ist besonders ausgeprägt und der Sauerstoff ist in der gesamten Atmosphäre nahezu gleich verteilt. In der Arbeit von Stam (2000) werden die verschiedenen Anwendungsbereiche atmosphärischer Gasabsorptionen beschrieben und ausführlich auf die O₂A-Bande eingegangen. Ein Ergebnis dieser Arbeit war, dass der Polarisationsgrad im Bereich einer Absorptionslinie sehr stark von der vertikalen Verteilung des atmosphärischen Aerosols abhängt. Es konnte aus den numerischen Modellrechnungen geschlossen

werden, dass Informationen über die vertikale Verteilung von Aerosolen aus spektral hoch aufgelösten Polarisationsmessungen in der O2A-Bande gewonnen werden können. Auch in der Arbeit von Boesche (2008) werden die Gasabsorptionsbanden des O2A und des CO2 im Bezug zu Aerosolen und Polarisation untersucht. Er kommt zu dem Schluss, dass unter Einbeziehung der Information von Polarisationsmessungen in den Absorptionsbanden, Abschätzungen der vertikalen Höhe einer einzelnen Aerosolschicht möglich sind. Im Falle von mehreren Schichten von Aerosol aber nur schwer auf die vertikale Schichtung geschlossen werden kann.

Im Rahmen der Messkampagne ACE-2 (second Aerosol Characterisation Experiment) wurden gemeinsame Sonnenphotometer- und Polarisationsmessungen durchgeführt und in dem Artikel von Elias et al. (1999) und seiner Dissertation (Elias 2000) ausführlich beschrieben. Daraus geht hervor, dass durch die Kombination beider Messverfahren viele Aerosol-Parameter zum Teil redundant abgeleitet und verglichen werden können. Es zeigen sich zum Teil gute Übereinstimmungen, aber auch große Unterschiede bei einem direkten Vergleich der eingesetzten Geräte und Verfahren. Es werden z.B. Schwachstellen in den bisherigen Modellen aufgezeigt, da in diesen Aerosole oft vereinfacht als sphärische Teilchen angenommen werden. Schmid et al. (2003) weisen darauf hin, dass die regionale Änderung von Strahlungsgrößen zur Erfassung klimatologisch relevanter Größen nur durch den Einsatz verschiedener Techniken und Messplattformen zu einem gewissen Grad zuverlässig bestimmt werden kann. So können z.B. große Fehler bei Sonnenphotometer-Messungen aufgrund ihres meist großen Öffnungswinkels ($0,6-2,5^\circ$) entstehen. Ohne Korrektur des zusätzlichen diffusen Anteils des Lichtes zum direkten Sonnenlicht würde es zu einer Unterschätzung der Aerosoloptischen Tiefe (AOT) kommen (Russel et al. 2004).

Neue Anwendungsbereiche können durch die Erweiterung der Messung mit Multidirektionalität (*multi-angle*) erschlossen werden. Als Beispiel für diese Art von

Messung und Instrument kann das für Ende 2010 geplante Satelliteninstrument APS (Aerosol Polarimetry Sensor) auf der Glory Platform genannt werden (Mishchenko et al. 2007). APS soll mit Hilfe von multidirektionaler, multispektraler und der Messung der linearen Polarisationsseigenschaften des von der Erde reflektierten Lichtes neue Verfahren zur Aerosol- und Wolkenfernerkundung ermöglichen.

Aktuelle Labormessungen (Sparks et al. 2009) aus dem Gebiet der Astronomie zeigen, dass die zirkulare Polarisation im sichtbaren Spektralbereich bei der Reflexion an Pflanzen, Mikroben und Cyanobakterien eine Rolle spielt. Es wird auf die Balance zwischen Erzeugung und Auslöschung der Polarisation durch Streuung eingegangen und in Labormessungen gezeigt, dass zur weiteren Verwendung des zirkularen Polarisationsgrades Werte zwischen 0,01 bis 0,1 % nötig sind. Gute astronomische Instrumente (Hough et al. 2006) erreichen bereits Genauigkeiten in der Messung des zirkularen Polarisationsgrades von 0,001 % bei ausreichend großen Lichtintensitäten.

5. Entwicklung eines Systems zur Messung des gestreuten Sonnenlichtes

Zu den im Folgenden beschriebenen und hier vorgestellten Arbeiten zur Messung des gestreuten Sonnenlichtes einschließlich der Polarisation wird eine Definition des Anwendungsbereiches benötigt. Für die Entwicklung eines neuen Instrumentes und dessen Geräte-spezifischen Eigenschaften werden Vorgaben erarbeitet. Es werden Basis-Messgrößen und deren mögliche Messunsicherheiten diskutiert.

Der zu definierende Anwendungsbereich ist in diesem Fall die Erfassung der gestreuten Sonnenstrahlung mit optischen Messmethoden. Eine zuerst zu nennende messbare Größe im sichtbaren bis nahem Infrarot in der Atmosphäre ist die Radianz oder auch Strahldichte. Diese wird in einem spektralen Bereich mit definierter spektraler Bandbreite angegeben und man nennt sie dann die spektrale Strahldichte ($W / sr m^2 \mu m$). Diese Größe kann an einem beliebigen Punkt in der Atmosphäre in eine beliebige Richtung bei festgelegter Wellenlänge und innerhalb eines festgelegten Zeitraums gemessen werden. Für spätere Vergleiche mit Strahlungstransport Simulationen folgt daraus, dass während einer Messung einige Zusatzinformationen bekannt sein müssen. Diese Zusatzinformationen werden mit weiteren Sensoren erfasst. Für die Position z.B. wird in der Regel ein GPS (Global Position System) benutzt. Dieses System gibt die Position global meist besser als 10 m an und kann mit speziellen Auswertungsverfahren (differential GPS) bis in den cm Bereich gesteigert werden. Um die Richtung, in der gemessen wird, zu bestimmen, kann z.B. die Position der Sonne verwendet werden. Die Position der Sonne relativ zum Betrachter und die daraus resultierenden Beobachtungswinkel relativ zur Sonne können bei bekannter Uhrzeit und Position in nahezu beliebiger Genauigkeit berechnet werden (Bretagnon and Francou 2006). Die einfache Positionsbestimmung ist insbesondere im Falle einer bewegten Messplattform mit

dem GPS als Grundlage zur Berechnung der Sonnenposition jedoch zu ungenau. Es sollten daher zusätzlich die Winkel Azimut und Elevation und damit die Winkel zwischen Sonne und der Messrichtung direkt gemessen werden. Eine weitere Möglichkeit, die Lage im erdnahen Raum zu erfassen, sind sogenannte Inertial- oder Lagereferenzsysteme, die in Kombination mit einem GPS-Empfänger und anderen Sensoren zur Messung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung hohe Genauigkeiten für Lage und Position im Raum erreichen (z.B. Kennedy et al. 2005).

Mit der vorher genannten Strahldichte und den dazu gehörenden Zusatzinformationen sind noch nicht alle möglichen Informationen erfasst, die mit optischen Messverfahren möglich sind. Die Messung der schon vorher erwähnten Polarisationsseigenschaften des Lichtes bieten weitere Messmöglichkeiten für die Ableitung der in den verschiedenen Anwendungsbereichen benötigten Parameter. Die Polarisationsseigenschaften lassen sich in den linearen und dem zirkularen Anteil aufteilen. Wie in einem vorherigen Kapitel gezeigt, können alle Eigenschaften der elektromagnetischen Welle mit Hilfe des Stokes-Vektors dargestellt werden. Mit der Hilfe eines Polarisators wird dies für die ersten drei Parameter des Stokes-Vektor erreicht. Für lineare Polarisation wird in eine Raumrichtung die Strahldichte in mindestens drei verschiedenen ausgerichteten und voneinander unabhängigen Polarisationssebenen gemessen (Preusker 1995). Es wird für jede Messung ein unterschiedlich ausgerichteter Polarisator vor der Einkoppeloptik benötigt. Bei bekannten Winkeleinstellungen der Polarisationsfilter relativ zur Messrichtung kann so ein Stokes-Vektor mit den drei Komponenten I, Q und U bestimmt werden. Die Messung bei unterschiedlich ausgerichteten Polarisationsfiltern kann auf zwei Arten erfolgen. Bei sequentieller Messung wird nacheinander mit unterschiedlichen Einstellungen der Polarisationsfilterebene gemessen. Dazu wird nur eine optische Lichteinkopplung und Detektor benötigt. Simultan erfolgt die Messung mit mehreren Polarisationsfiltern und spektralen Detektoren gleichzeitig.

Zur Messung des vollen Stokes-Vektors werden weitere optische Lichteinkopplungen und Komponenten benötigt. Für die Realisierung eines Messsystems stellt sich die Frage wie viele Einkoppeloptiken benötigt man, welche optimalen Winkelstellungen haben Verzögerungsplatte und Polarisator und wie legt man die Winkel-Referenzebene fest. Die Art und der Aufbau des Gerätes wird dadurch entscheidend beeinflusst. Für die Messung des linearen Stokes-Vektors, in einem breiten Spektralbereich findet sich leicht eine mögliche optimale Konfiguration mit vier Einkoppeloptiken und den Polarisationswinkeln von 0° , 45° , 90° und 135° relativ zur Referenzebene (Walraven 1981). Bei der Messung der vierten Komponente des Stokes-Vektors und damit des zirkularen Anteils wird die Bestimmung schwieriger. Tyo (2002) untersuchte hierzu verschiedene Arten von Stokes-Polarimetern und bestimmte optimierte Winkelpositionen mit Hilfe der Optimierung des Signal zu Rauschverhältnisses und der Minimierung von *Condition Numbers*. Die Optimierung kann in Abhängigkeit der Aufgabenstellung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (Hollstein et al. 2009). Sie sind von den zu erwartenden zirkularen und linearen Polarisationsgraden und dem Wellenlängenbereich in dem gemessen werden soll abhängig.

Die simultane Messung der verschiedenen Intensitäten für verschiedene Winkelstellungen von Polarisationsfilter und Verzögerungsplatte ist von Bedeutung, da sich der Sonnenstand durch die Bewegung der Erde während der Messung ständig ändert und die möglichen atmosphärischen Veränderungen die Messung beeinflussen. Dies bedingt mehrfache Einkoppeloptiken und für multispektrale Messungen auch mehrere Spektrometer. Soll auch die vierte Komponente des Stokes-Vektors gemessen werden, ist dies durch zusätzliche Messungen mit einer Verzögerungsplatte möglich. Für viele Anwendungen in der Atmosphäre kann die zirkulare Polarisations vernachlässigt werden, da diese in der Regel nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamt-Strahlungsintensität hat (Kattawar et al. 1976, Guirada et al. 2007). Für Instrumente, die selber die Polarisationsseigenschaften des

zu messenden Lichtes aufgrund ihres optischen Aufbaus, verändern, kann es trotzdem wichtig sein, diesen Anteil bei der Messung zu berücksichtigen und mit zu messen.

Eine wichtige Größe, die bei einem zu entwickelnden Gerät festgelegt werden muss, ist die Messgeschwindigkeit mit der gemessen werden soll. Die Festlegung ist schwierig, da sie von vielen anderen Festlegungen abhängt. Es muss ein für viele Anwendungen akzeptabler Kompromiss gefunden werden. Simultane Messungen können in einer viel kürzeren Zeit durchgeführt werden und führen zu einer zeitlich höher aufgelösten Messung. Dies führt auch zu einer höheren Genauigkeit der abgeleiteten Größen, da diese durch die simultane Messung nicht durch die kleinskaligen Variabilitäten der Atmosphäre verfälscht werden. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber sequentiellen Geräten, die meist weder simultan multispektral noch in mehreren Polarisationssebenen simultan messen. Mit simultanen multispektralen Polarisationsmessungen können erstmals auch zeitlich kleiner-skalige Veränderungen in der Atmosphäre bestimmt werden.

Aus Messungen mit Polarisator und Verzögerungsplatte können die Polarisationsseigenschaften des gestreuten Sonnenslichtes in Form des Stokes-Vektors als abgeleitete Größe bestimmt werden. Dieser kann aber nur mit hohem Aufwand in einem breitem Spektralbereich vollständig bestimmt werden. Es müssen z.B. für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich unterschiedliche Detektoren und damit auch unterschiedliche Spektrometer benutzt werden. Angepasst an den jeweiligen Spektralbereich folgen daraus mehrere Einkoppeloptiken. Dies ist auch ein Grund dafür, dass in der Vergangenheit in der Regel der zirkulare Anteil des polarisierten Lichtes vernachlässigt wurde. Wie schon vorher erwähnt, nimmt der zirkulare Anteil in der Natur nur unter sehr speziellen Bedingungen eine relevante oder auch messbare Größe an. Im Falle von stark linear polarisiertem Licht kann bei bekanntem Polarisationswinkel des zu messenden Lichtes eine geeignete Stellung der Polarisationsfilter und eine optimierte Lichtintensität auf den jeweiligen

Detektoren erreicht werden. Dies erhöht das Signal-Rausch Verhältnis des zu messenden Signals.

Eine weitere aus dem Stokes-Vektor abgeleitete Größe ist der Polarisationsgrad und -winkel. Er wird unterteilt in zirkularen (*DOCP: Degree of circular polarization*) und dem linearen (*DOLP: Degree of linear polarization*) Polarisationsgrad. Die aus dem Stokes-Vektor berechneten linearen und zirkularen Anteile und der Polarisationsgrad und -winkel sind die Basisgrößen, die benötigt werden um Vergleiche mit Größen aus Strahlungstransport-Simulationen durchführen zu können.

Im Falle der Messung multispektraler Strahldichten hängt vieles von dem ebenfalls festzulegenden spektralen Wellenlängenbereich, der Anzahl der darin enthaltenen spektralen Kanäle und des in der Natur vorkommenden Dynamikbereichs des gestreuten Lichtes ab. Somit muss die Anzahl der interessierenden Spektralkanäle und deren spektrale Auflösung festgelegt werden, die sich aus den vorher festgelegten Anwendungsbereichen ergeben. Hat man dies festgelegt, kann man in der Regel auch eine mögliche Messart festlegen. Bei einigen wenigen Kanälen kann man z.B. mit Einzeldetektoren und entsprechenden optischen Interferenzfiltern arbeiten. Mit diesen lassen sich spektrale Auflösungen von 1 bis 2 nm erreichen. Möchte man in einem breiten Spektralbereich möglichst viele Spektralkanäle erfassen, so bieten sich Gitterspektrometer an. Diese können sehr hohe spektrale Auflösungen erzeugen. Das heißt aber wiederum, dass die Detektoren sehr empfindlich sein müssen, um die geringen Strahlungsintensitäten zu messen, die durch das Spektrometer bis zu den Detektoren gelangen. Vorteil von Gitterspektrometern ist die leichtere Realisierbarkeit von abbildenden Spektrometern. Ein höheres Verhältnis von Auflösung zu Messzeit erreicht man mit einem Fabry-Perot Spektrometer. Dies hat aber wiederum den Nachteil, dass es im optischen Aufbau aufwendig ist, um es in einem breiten Spektralbereich einzusetzen. Ähnliches gilt für Echelle Spektrometer. Um die vorher genannten Vor-

und Nachteile abzuwägen und einen Kompromiss zu finden, spielt hierbei abgesehen von den Kosten, die spektrale Bandbreite, Auflösung und die Anzahl der Spektralkanäle eine entscheidende Rolle.

Für die später folgende Beschreibung der erforderlichen Systemeigenschaften und die Umsetzung in eine technische Spezifikation gilt es außerdem die Messgeometrien und somit die Messart festzulegen. Zur Messgeometrie gehört die Definition der Größe und die Richtung des Öffnungswinkels. D.h. die Winkel, die definieren aus welcher Richtung die Strahlung in das Gerät gelangt und aus welchen zulässigen Winkelbereich um diese Richtung herum Strahlung gemessen werden soll. Im Fall von aufwärts gerichteten atmosphärischen Messungen sind in diesem einen Messwert folglich die vertikalen Informationen der darüber liegenden Luftsäule integral enthalten. Um Informationen der vertikalen Variabilität dieser Säule zu erhalten, reicht es in der Regel nicht aus, nur eine Messung durchzuführen. Hierzu dienen Messungen mit Vertikalsondierungen mittels Ballon oder einem Flugzeug. Dabei können durch eine Vielzahl von Messungen in den unterschiedlichen Höhen Informationen zur vertikalen atmosphärischen Variabilität ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit bietet z.B. eine spektral hoch aufgelöste Messung in Gas-Absorptionsbanden wie in der Sauerstoff- oder Kohlendioxidbande. Hier kann die unterschiedliche Form der Absorptionslinien in Abhängigkeit der Höhe Informationen zur vertikalen Schichtung z.B. von Aerosolen enthalten (Stam 2000).

Andere Messgeometrien wie z.B. die so genannte *Principal plane* oder *Almucantar* werden zur Untersuchung der gestreuten Strahlung in der Atmosphäre herangezogen. Mit Hilfe dieser Messgeometrien kann z.B. auf die Streueigenschaften der in der Luft befindlichen Aerosole geschlossen werden (Nakajima et al. 1996).

Außer den vorher beschriebenen Festlegungen muss der Messort festgelegt

werden. So kann z.B. ein bodengebundenes stationäres Gerät viel mehr Platz beanspruchen, als ein für mobile Einsatzzwecke entwickeltes Gerät. Bodengebundene Strahlungsmessinstrumente messen in der Regel nur die abwärtsgerichtete Strahlung, während flugzeuggestützte Instrumente prinzipiell aufwärts- und abwärtsgerichtete Strahlung messen können. Bei mobilen Geräten muss zusätzlich zur Messrichtung noch die mögliche Bewegung des Fahrzeugs (Auto, Schiff, Flugzeug, Satellit) während der Messung beachtet und unter Umständen kompensiert oder erfasst werden.

Zusammenfassung der nötigen Festlegungen und Definitionen des Anwendungsbereiches eines zu entwickelnden Gerätes:

Boden gebunden:

- Anwendungsbereich
 - > optische Messung gestreuter Sonnenstrahlung im sichtbaren bis nahem Infrarot einschließlich der Polarisierung
- Basismessgrößen
 - > spektrale Strahldichte + Polarisierung
- 1. abgeleitete Größen
 - > Stokes-Vektor
 - > Polarisierungsgrad
 - > Polarisierungswinkel
- Zusatzinformationen
 - > Position, Zeit, Temperatur, Druck, Feuchte, Meßgeometrie

Mobil:

Im wesentlichen wie Boden gebunden, aber zusätzlich variable in Ort und Höhe.

- Zusatzinformationen
 - > Position, Lage des Messinstrumentes im Raum

5.1. Umsetzung und technische Spezifikationen

Es folgt nun die Beschreibung und Festlegung der erforderlichen Systemeigenschaften und deren technische Umsetzung, die zur Entwicklung eines Systems zur optischen Messung der in der Atmosphäre gestreuten Sonnenstrahlung führen. Im Folgenden werden die Instrumente beschrieben, die zu einer messtechnischen Verbesserung im Hinblick auf die Auswertbarkeit für neu zu entwickelnde Fernerkundungsmethoden geführt haben. Die in der Vergangenheit in der Strahlungsmesstechnik eingesetzten Instrumente ermöglichten nur bis zu dem jeweiligen Stand der Technik Fortschritte in der Entwicklung von Verfahren zur Ableitung klimarelevanter Größen (Prosch et al. 1983, Hennings 1985, Preusker 1997). Trotz einiger Fortschritte sind Ableitungsverfahren zur Charakterisierung von Aerosolen mit Fernerkundungsmethoden immer noch ungenügend validiert (Li et al. 2009).

Am Institut für Weltraumwissenschaften wurde daher ein Aureolen-Sonnenphotometer FUBISS-ASA (Asseng 2002, Asseng et al. 2004) entwickelt, das zusätzlich zur direkt gemessenen Strahlungsintensität der Sonne simultan die diffuse Strahlung in der Aureole der Sonne misst und somit zusätzliche Informationen über die Eigenschaften des in der Luft befindlichen Aerosols geben kann. Mit FUBISS-Polar kam die zusätzliche Messung der Polarisations-eigenschaften des gestreuten Lichtes dazu. Diese Entwicklung erfolgte im Rahmen der Arbeit von Eyk Bösche (Bösche et al. 2003, 2006). Es wurde ein bodengestütztes Polarimeter zur Messung der abwärts gerichteten Strahlung entwickelt, das simultan zu FUBISS-ASA betrieben werden kann.

Die nächste Stufe in der Entwicklung zur Messung der gestreuten Strahlung war das am Institut entwickelte Aureolen-Sonnenphotometer FUBISS-ASA2 (Zieger 2006). Dieses misst die diffuse Strahlung simultan zur direkten in zwei verschiedenen Winkelbereichen (Aureolen) um die Sonne. Damit kann auf das Streuverhalten der

Aerosole in Vorwärtsstreureichtung und somit auf die Phasenfunktion und den Typ des Aerosols geschlossen werden (Zieger et al. 2007). Eine Weiterentwicklung der Methodik konnte in der Arbeit von v. Bismarck (2008) unter Einbeziehung der Messung der Zenitstrahldichte gezeigt werden.

Anschließend wurde am Institut für Weltraumwissenschaften im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) mit der Entwicklung von URMS/AMSSP (Universal Radiance Measurement System / Airborne Multispectral Sunphoto and Polarimeter) begonnen. Dieses System ermöglicht multidirektionale, multispektrale Messungen vom Flugzeug, einschließlich des vollen linearen und zirkularen Anteils der gemessenen Strahlung (Hollstein et al. 2009), (Ruhtz et al. 2009).

Die Grundlage für die folgenden Beschreibungen bildet das Free University Berlin Integrated Spectrographic System (FUBISS) (Ruhtz 1999a,b). Dazu gehören das Sonnenphotometer FUBISS-ASA1 (Aureole Sunphotometer Adatpter 1, Asseng et al. 2002), FUBISS-ASA2 (Aureole Sunphotometer Adatpter 2, Zieger et al. 2007), FUBISS-Polar (Ruhtz et al. 2001, 2002, Bösche 2002), FUBISS-ZENITH (Bismarck 2009) und URMS/AMSSP (Hollstein 2008, Ruhtz et al. 2009). Das System URMS/AMSSP bildet hierbei das aktuellste Instrumenten Design und wird von der Konzeption und der Kombination eines Sonnenphotometers mit einem Polarimeter neue Verfahren zur Ableitung von Aerosol- und Wolkenparametern ermöglichen.

5.2. FUBISS

Das FUBISS-System (Ruhtz 1999 a,b) resultierte aus einer Neuentwicklung, die aus einer Verkleinerung und Modularisierung des bestehenden Spektrometer-Systems Ovid (Schueller et al. 1997) erfolgte. Abbildung 5.1 zeigt das System FUBISS in seiner ersten Version. Durch die Benutzung neuer Spektrometer und Interface-Elektroniken konnte eine Gewichts- und Größenverkleinerung von etwa einer Größenordnung im Vergleich zu Ovid erreicht werden.



Abbildung 5.1: FUBISS erste Version

Allerdings konnten die hohen spektralen Auflösungen im sichtbaren Spektralbereich (300 – 750 nm) von etwa 1-3 nm im Vergleich mit dem alten System nicht erreicht werden. Dies wurde aufgrund der deutlichen Größenreduzierung und der besseren messtechnischen Stabilität der neuen Spektrometer in Kauf genommen. Die spektrale Auflösung lag bei 7,5 nm mit 150 Kanälen und einem spektralen im Bereich von 400 – 750 nm. Im nahen Infrarot (750 – 1000 nm) konnten 2,4 nm spektrale Auflösung mit 512 spektralen Kanälen und im weiteren nahen Infrarot (1000 – 1700 nm) 18 nm Auflösung mit 128 Kanälen erreicht werden. Das

System wurde hauptsächlich am Boden für Zenit-, Reflektanz- und auch Unterwassermessungen eingesetzt (Abbildung 5.2). Im Flugzeug wurde das FUBISS System während der internationalen Messkampagne BBC 1 (Baltex Bridge Campaign 1) 2001 eingesetzt (Schröder et al. 2004). Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele für Messungen mit FUBISS.

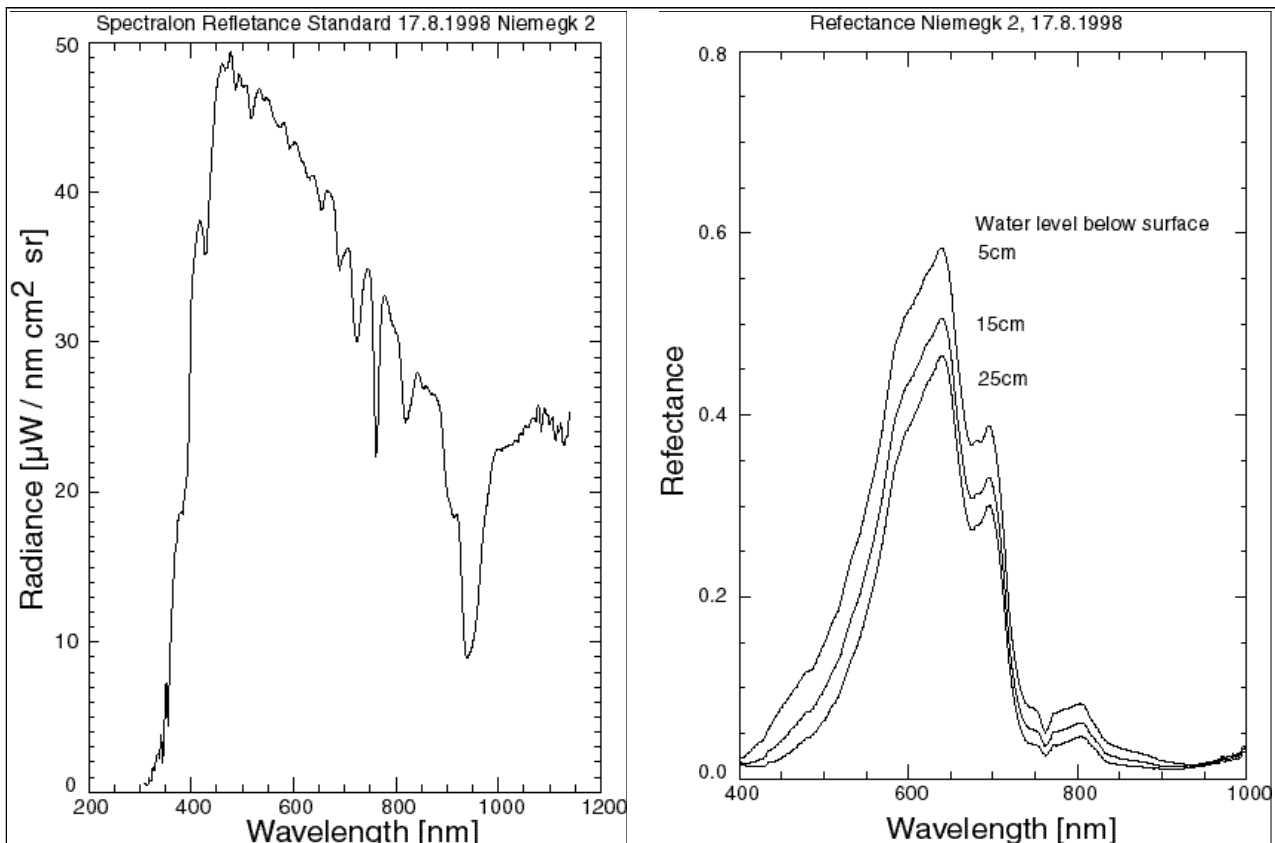
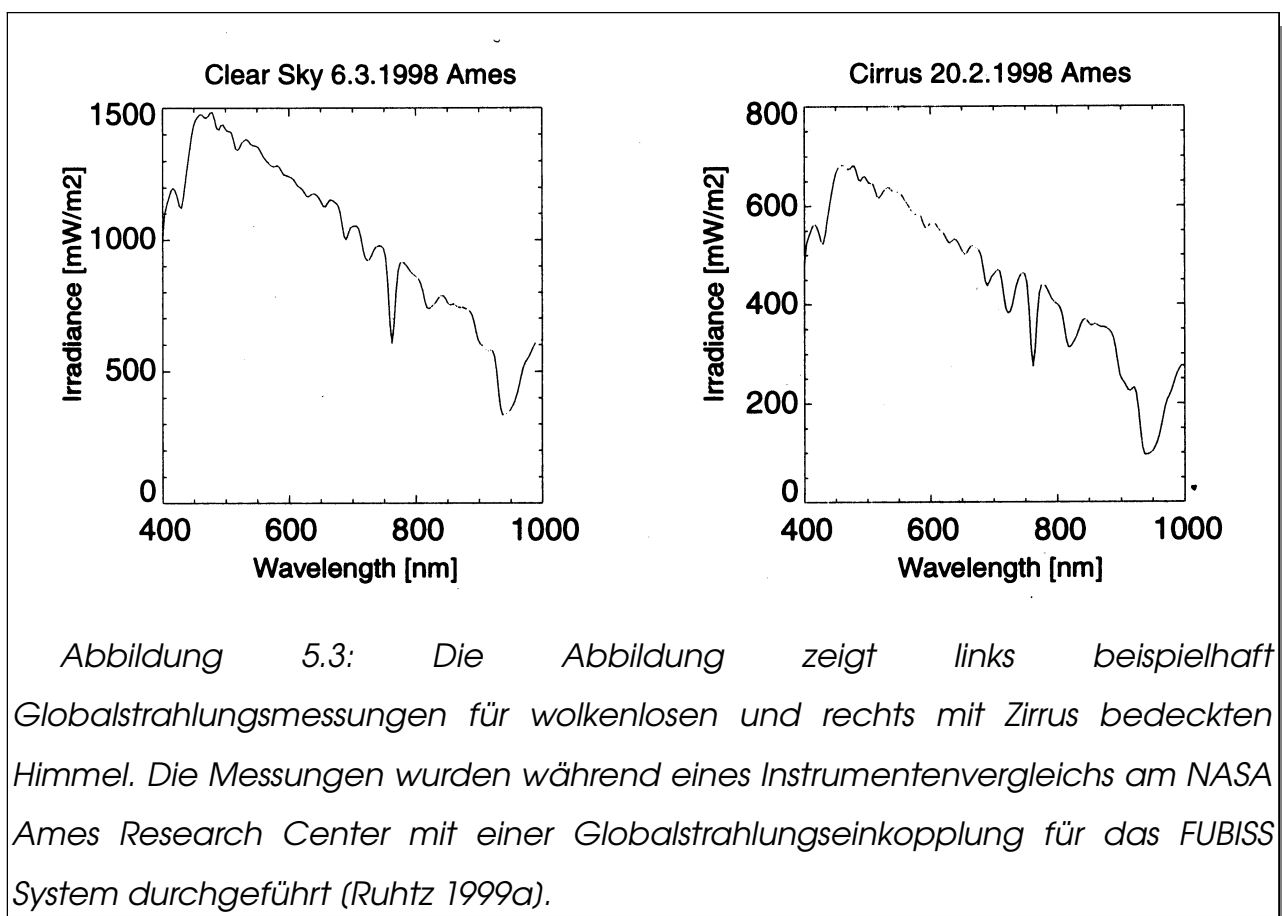


Abbildung 5.2: FUBISS Messungen durchgeführt vom Institut für Geografie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (1998). Auf der linken Seite ist die Messung eines Reflektanz Standards bei direkter Sonnenbestrahlung zu sehen. Auf der rechten Seite ist die relative spektrale Reflektanz für verschiedene Wassertiefen abgebildet.

Auf der linken Seite von Abbildung 5.3 sieht eine Einzelmessung der Globalstrahlung für den wolkenlosen Fall und auf der rechten Seite eine Messung

bei Cirrus Bewölkung. Beide Messungen wurden mit einer hemisphärischen Globalstrahlungs-Einkopplung durchgeführt. Hierbei wird über den gesamten oberen Halbraum die diffuse Strahlung integriert. Bei wolkenlosem Himmel wird folglich auch das direkte ungestreute Licht der Sonne mit integriert. Im Falle des Cirrus wird das meiste Licht der Sonne gestreut bzw. in den Weltraum zurück reflektiert und es fällt nahezu keine direkte Strahlung auf die Einkoppeloptik. Daher ist die Intensität der Globalstrahlung für den Fall von Cirrus-Bedeckung nur etwa halb so groß.



5.3. FUBISS-ASA1

Die Erweiterung des FUBISS-Systems wurde mit der Entwicklung von FUBISS-ASA1 (Asseng et al. 2002) (Abbildung 5.4 rechts) fortgesetzt. Die Erweiterung zur Messung des direkten und diffusen Anteils im Vorwärtsstrebereich des gestreuten Sonnenlichtes sollte der besseren Charakterisierung der Aerosole in der Atmosphäre dienen. Die optische Einkoppeleinheit ASA1 (Version 1) wird über eine Glasfaser modular an die Spektrometer angeschlossen. Mit dieser Art Messung können, wie schon vorher erwähnt, Aerosol-optische Tiefen (AOT) bestimmt werden. Außerdem können im Falle von flugzeuggestützten Vertikalaufstiegen Extinktionskoeffizienten abgeleitet werden. Die Entwicklung einer automatischen Nachführung ermöglichte außerdem eine weitere Entwicklung, der simultanen Messung der Aureole. D.h. die gestreute Strahlung in einem spezifizierten Winkelbereich um die Sonne herum zu messen. Im Falle von FUBISS-ASA1 wird die Aureole in einem Bereich von $3.7 - 4.8^\circ$ um die Sonne herum gemessen. Die Aureolen Einkoppeleinheit wird parallel mit der des direkten Sonnenlichtes auf einer gemeinsamen automatischen Sonnennachführung betrieben.

Der direkte Sonnenpfad hat einen Öffnungswinkel (FOV: *Field of View*) von 2.4° . Dieser recht große aber nach WMO (World Meteorological Organization) Empfehlungen gewählte FOV wurde im Hinblick auf einen Einsatz des Gerätes auf einer bewegten Plattform gewählt. Typische stationäre Sonnenphotometer wie die der meisten Aeronet Stationen (Holben et al. 1998) haben einen Einkoppelwinkel von 0.6° und er ist somit nur wenig größer als der Öffnungswinkel der Sonne. Dieser beträgt 0.53° und ergibt sich aus dem Durchmesser und Abstand der Sonne zur Erde. Mit dem gewählten Bereich von 2.4° konnte eine sichere Kompensation der Bewegung bei gleichzeitig geringer Beeinflussung des Messsignals erreicht werden. Eine Ausrichtungsabweichung führt somit erst ab etwa 1.5° zu größeren Messunsicherheiten (Asseng 2002). Die Unsicherheit, die durch den großen Einkoppelwinkel selber entsteht, kann durch Einführung eines zu berechnenden

Korrekturfaktors (Schmid et al. 2003) minimiert werden. Dazu steht außerdem auch die Messung der Aureole zur Verfügung. Die Sonnenphotometer-Einkopplung besteht in erster Linie aus einer Glasfasereinkopplung und einer Filterkombination zur Abschwächung des einfallenden direkten Sonnenlichtes. Das Licht wurde mit Hilfe einer Filterkombination in dem Spektralbereich von 400-800 nm stärker abgeschwächt als in den Randbereichen kleiner 400 nm und größer 800 nm. Dadurch erreicht man ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis in den Randbereichen und eine gleichmäßigere Aussteuerung der gemessenen Signale. Bei der Aureole werden keine optischen Filter eingesetzt. Der große Einkoppelbereich der gewählten Glasfasern ermöglicht eine Blendenkonstruktion bei gleichzeitiger Abschattung der Sonne in einen Bereich bis 25° FOV. Der durch die Blenden reduzierte sichtbare Winkelbereich von ca. 1.1° entspricht bei einer sehr klaren Atmosphäre der gleichen Lichtmenge, wie die des direkt gemessenen und mit den entsprechenden Filtern abgeschwächten Signals des Sonnenlichtes. Es kann somit mit den für diesen Fall für die Auswertung wichtigen gleichen Messzeiten für Sonnenphotometer und Aureole gemessen werden.



Abbildung 5.4: Einkoppeloptiken FUBISS-Polar (links) und FUBISS-ASA1 (rechts)

Im Rahmen der internationalen Flug- und Bodenmesskampagne AGRISAR 2006 wurde FUBISS-ASA1 und ein Cimel verglichen. Das Cimel wird weltweit als Standard in den Aeronet Stationen (Holben et al. 1998) zur Bestimmung der Aerosol optischen Tiefe eingesetzt und unterscheidet sich deutlich vom Messprinzip, im Vergleich zu FUBISS-ASA1. Während bei FUBISS-ASA1 die Spektralinformation simultan mit Hilfe von Spektrometern gemessen wird, kommt beim Cimel in der Regel ein Einzeldetektor mit Filterrad zum Einsatz. Damit geht die kleinskalige Änderung der Atmosphäre zum Großteil verloren, da mit einem Filterrad die Messung an mehreren Spektralstützstellen nacheinander erfolgen muss. Auch der Einsatz der schmalbandigen optischen Interferenzfilter erzeugt u.a. aufgrund ihrer Temperaturabhängigkeit und der zeitlichen Variabilität eine Drift in den Kalibrationskoeffizienten. Neuere Sonnenphotometer mit Interferenzfiltern wie z.B. das Sara der LMU München oder AATS-14 des NASA Ames Research Centers verwenden für jeden Interferenzfilter einen einzelnen Detektor, um simultan messen zu können.

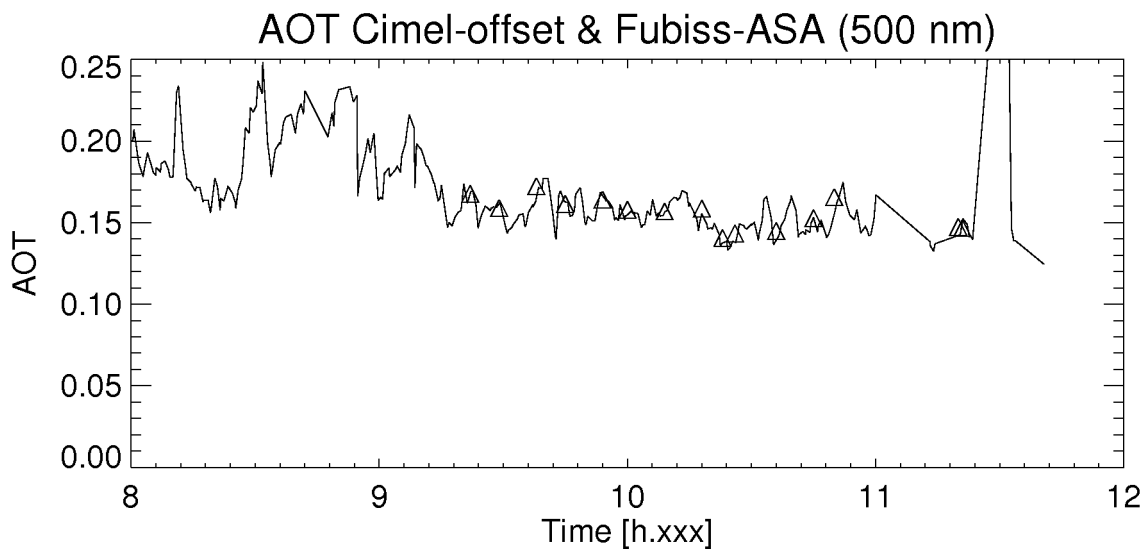
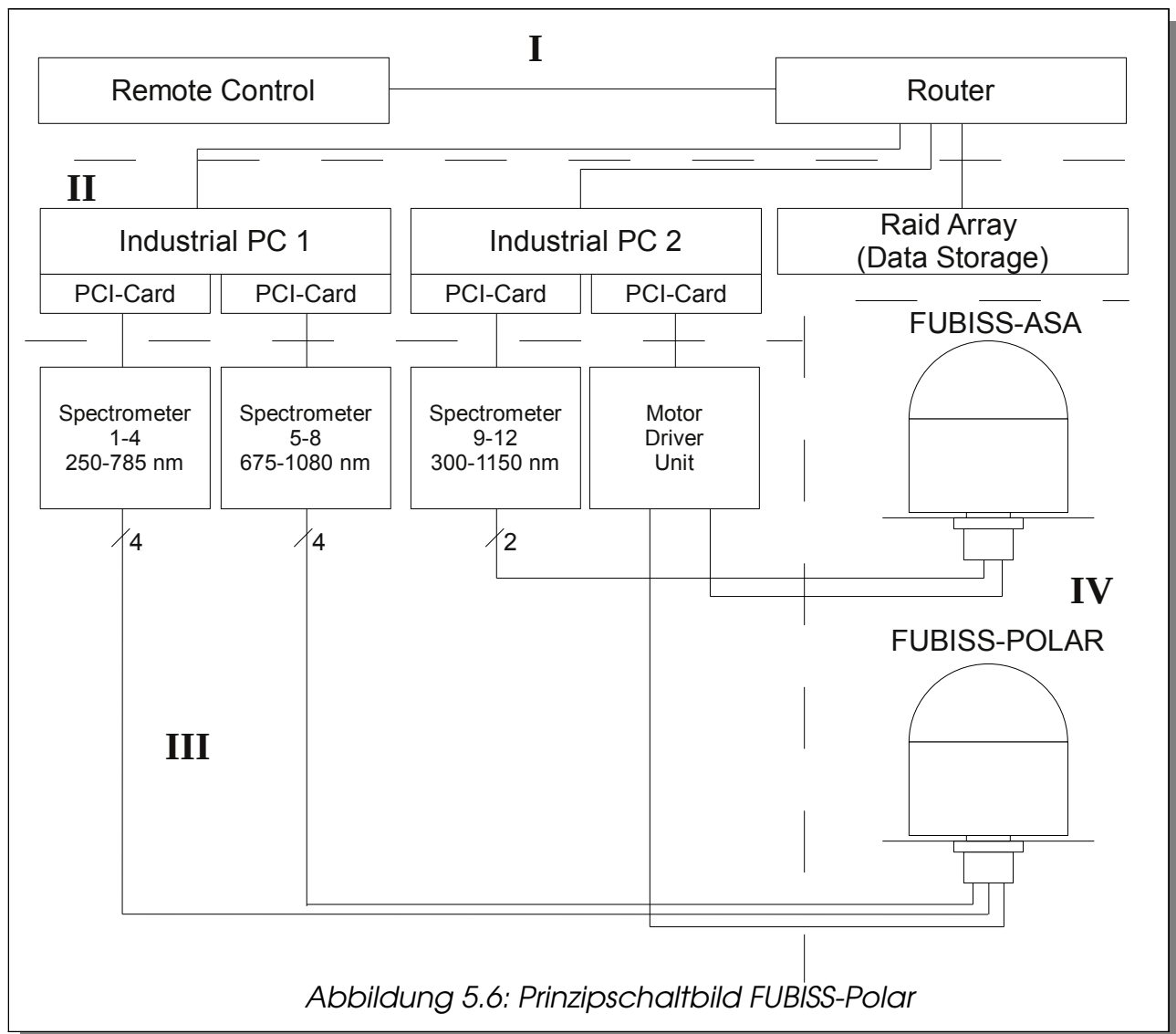


Abbildung 5.5: Dieses Beispiel für FUBISS-ASA1 zeigt Messungen, während der Agrisar Kampagne 2006 (Linie), der Aerosol optischen Tiefe (AOT) über mehrere Stunden im Vergleich zu einem Cimel (Dreiecke). Man erkennt deutlich die kleinskalige Variabilität der Atmosphäre, die mit FUBISS-ASA1 erfasst werden kann.

Die Prozessierung der Daten von FUBISS-ASA1 und 2 wird in den Arbeiten von Asseng (2002), Zieger (2006) und Bismarck (2009) beschrieben.

5.4. FUBISS-POLAR

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes folgte nach FUBISS-ASA1, die Entwicklung von FUBISS-Polar (Ruhtz et al. 2001, Ruhtz et al. 2002, Boesche 2002). Mit diesem System ist es möglich, simultan zu FUBISS-ASA1, Messungen der linearen Polarisation in der *principal plane* durchzuführen. Während eines *principal plane* scans wird in Richtung Sonnen-Azimuth bei verschiedenen Elevationswinkeln (0-180°) gemessen. Abbildung 5.6 zeigt das Prinzipschaltbild der verschiedenen Komponenten beider FUBISS Systeme. Es teilt sich in 4 Blöcke, die mit einer gestrichelten Linie abgegrenzt sind.



Der erste Block (I) besteht aus den Komponenten für die Steuerung des Gesamtsystems. Dazu gehört der Router, der alle angeschlossenen PC's (*Personal Computer*) miteinander über ein *Ethernet-interface* verbindet. Der als *Remote Control* bezeichnete externe PC dient zur externen Steuerung des Gesamtsystems.

Zum zweiten Block (II) gehören zwei IPC's (*Industrial Personal Computer*) zur Aufnahme der Interface-Elektroniken, zum Anschluß der Spektrometer (3. Block) und dem Massenspeicher (*Raid Array*) zum Speichern der Messdaten. IPC1 übernimmt die Steuerung der Spektrometer für die Polarisationsmessungen und IPC2 die Steuerung der Spektrometer für die Sonnenphotometer-Messungen. IPC2 steuert außerdem die Bewegung der beiden Einkoppeloptiken Fubiss-Polar und FUBISS-ASA (4. Block). Beide IPC's speichern Ihre Daten auf dem Raid-Array. Mit Hilfe einer zweiten Motorsteuereinheit (MDU) wäre ein vollkommen unabhängiger Betrieb beider Messeinheiten FUBISS-ASA und FUBISS-Polar möglich. Allerdings würde ein Teil der Vorteile, die durch den kombinierten Betrieb entstehen, wieder wegfallen. So ist z.B. die Änderung des Sonnenwinkels bei FUBISS-Polar während eines *principal plane scans* oder einer Almucantar-Messung mit Hilfe der aus der Sonnennachführung von FUBISS-ASA1 gewonnenen Information des Azimuth- und Elevationswinkels leicht nach zu führen bzw. zu kompensieren. Bei der *principal plane* Messung wird bei konstantem Azimutwinkel in Richtung der Sonne ein 0 bis 180° Schwenk der Einkoppeloptik durchgeführt. Umgekehrt wird eine Almucantar-Messung bei konstantem Elevationswinkel ein 0 bis 360° Schwenk der Einkoppeloptik durchgeführt. Beide Systeme können auch unabhängig voneinander, mit der entsprechenden Software zur Steuerung der Schwenkbewegungen betrieben werden.

Den nächsten Block (III) bilden die Spektrometer. Sie sind in drei unterschiedlichen Gehäusen untergebracht und funktionell getrennt. Die Spektrometer für das Sonnenphotometer decken den Spektralbereich 300 - 1150 nm ab. Die spektrale Auflösung beträgt ca. 10 nm. Die Spektrometer zur Messung

der Polarisation sind unterteilt in zwei Spektralbereiche. Der erste Bereich reicht von 250 – 785 nm und der zweite von 650 – 1080 nm. Diese Trennung ist bedingt durch die verschiedenen Anforderungsprofile beider Spektralbereiche. Zum einem wird so insgesamt ein möglichst breiter Spektralbereich abgedeckt und zum anderen ist so die spektrale Auflösung in den Bereichen um die Sauerstoffbande (O_2A) bei 765 nm höher. Auch aus diesem Grund wurden für diesen Bereich höher auflösende Spektrometer gewählt. Zum Block III gehört außerdem die Motorsteuereinheit, die später detaillierter beschrieben wird.

Der letzte Block (IV) beinhaltet die Einkoppeloptiken. Diese sind unterteilt in Sonnenphotometer (FUBISS-ASA1, Abbildung 5.3 rechts) und Polarisations-Einkoppeloptik (FUBISS-Polar, Abbildung 5.3 links). Beide können unabhängig voneinander betrieben werden und bilden somit eigenständige Einheiten. Sie werden beide jeweils durch zwei Motoren in Elevation und Azimut in einen Halbraum ausgerichtet. Damit lassen sich vom Boden aus betrachtet für jeden beliebigen Sonnenstand Messungen in jede beliebige Richtung des oberen Halbraumes durchführen.

Die Polarisations-Einkoppeloptik besteht in erster Linie aus einer Glasfaser-Einkopplung, einem Glan-Thompson Polarisationsprisma und Blenden zur Unterdrückung des Streulichtes. Der in ersten Feldversuchen (Bösche 2002) gemessene streulichtfreie Winkelbereich in Richtung Sonne beträgt minimal 12° . Streulichtfrei bezieht sich in diesem Fall auf das Geräte-interne Streulicht. Die sehr kleine und kurze Mechanikkonstruktion musste ausreichen, um ein möglichst kompaktes Design der 8 Spektrometer Einkoppeloptiken zu ermöglichen. Ein zusätzliches Abschattungsrohr vor dieser kompakten Einkoppeloptik kann zur Verringerung dieses Winkels und möglicher Streulichteffekte montiert werden. Die Glan-Thompson Polarisationsprismen bieten bei kompakten Design ein hohen Auslöschungskoeffizienten, in einem breitem Spektralbereich und einen großen maximalen Licht-Einfallswinkel von 17° . In Abhängigkeit von der Glasfaser und den

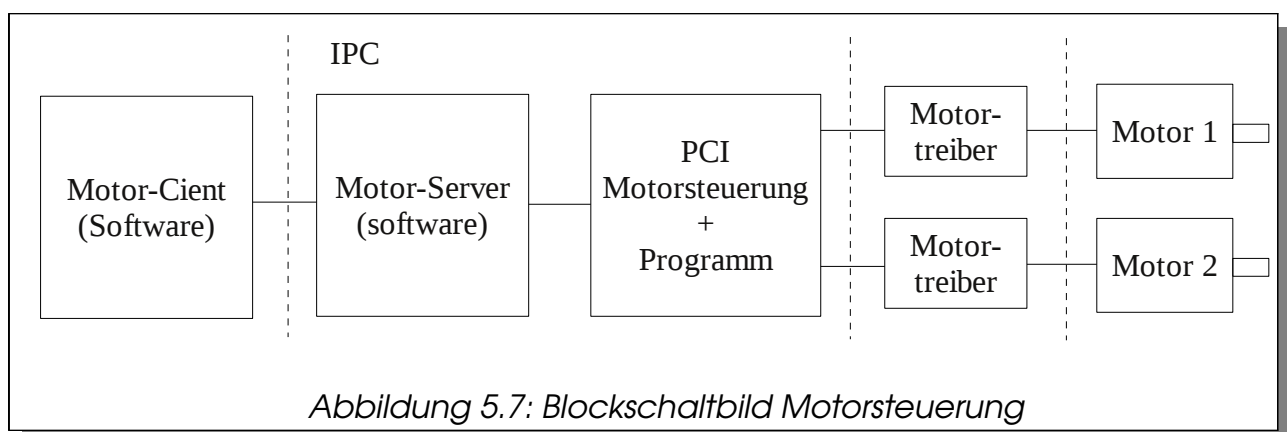
verwendeten Blenden wurde ein theoretischer FOV (field of view) von 4.58° berechnet und ein experimenteller mit 4.9° bestimmt (Bösche 2002). Wie schon vorher erwähnt, wurden insgesamt 8 Einkoppeloptiken benötigt. Diese wurden in zwei Gruppen auf den jeweiligen Spektralbereich optimiert. In den beiden Gruppen befinden sich jeweils unterschiedliche Glasfasern und der dazu passenden Einkoppeloptiken. Auch die Glan-Thompson Polarisationsfilter sind auf die beiden Spektralbereiche angepasst. Die unterschiedlichen Polarisationssebenen von 0° , 45° , 90° , und 135° wurden im Labor justiert und müssen regelmäßig auf Veränderungen kontrolliert werden.

Bei der Wahl der Glasfasern wurde hauptsächlich auf den Spektralbereich und dem möglichst geringen Einfluss von Änderungen des Biegeradius geachtet. Die verwendeten Multi-Fasern bestehen aus 30 Einzelfasern mit $105\ \mu\text{m}$ Einzeldurchmesser und ergibt ein Bündel von ca. $0,4\ \text{mm}$ Durchmesser. Der Einfluss der möglichen Biegeradius-Änderung wurde experimentell (Bösche 2002) für einen Bereich von -5° bis $+185^\circ$ (Elevation) bestimmt. Es ergab eine maximale Intensitätsänderung von kleiner $0.3\ \%$. Andere Fasern wie z.B. Mono-Fasern mit einem Kerndurchmesser von $0.8\ \text{mm}$ hatten hingegen Intensitätsänderungen von über 1% und wurden daher nicht verwendet. Die Verwendung von Glasfasern bringt aber nicht nur Vorteile. Leider sind durch die Benutzung der Multi-Fasern die Verbindungen und deren Kopplungseffizienz nicht immer reproduzierbar. Es muss also nach jedem Lösen der Glasfaser-Verbindung eine neue Kalibration des Gerätes erfolgen. Auch gibt es je nach verwendeter Faser in bestimmten Spektralbereichen zusätzliche Transmissionsverluste. Im ultravioletten Spektralbereich kann es aufgrund der hohen Energiedichte der Strahlung zu Materialveränderungen der Glasfaser bzw. des Klebematerials an der Steckverbindung (Solarisationseffekt) kommen, wenn nicht im Vorfeld die Strahlung der Sonne durch geeignete Filter abgeschwächt wird. Insgesamt ermöglichen die Glasfasern ein von der Größe her minimiertes Design. Die Einkoppeloptiken für Spektrometer ohne Glasfaser sind meist um ein vielfaches größer und die

Verwendung von spiegelnden Optiken mit ihren unter Umständen polarisierenden Eigenschaften macht die Entwicklung solcher Geräte komplizierter.

Die Bewegung und Ausrichtung der beiden Einkoppeloptiken FUBISS-ASA1 und FUBISS-Polar erfolgt durch einen der beiden IPC's. Mit Hilfe einer Motor-Interfacekarte und geeigneter Software kann ein auf dieser PCI-Karte (*Personal Computer Interface card*) befindlicher DSP (digitaler Signalprozessor) programmiert werden. Die Achsensteuerung ist mit einer speziell für Mehrachsensteuerungen ausgelegten PC Motor-Interfacekarte realisiert. Die Motor-Interfacekarte und der DSP sind speziell für Bewegungssteuerungen optimiert und ermöglichen komplizierteste Bewegungen, die unabhängig von der übrigen IPC-Hardware ausgeführt werden können. Die Motor-Interfacekarte verfügt über zusätzliche analoge und digitale Schnittstellen über die weitere Sensoren, die für eine Bewegungssteuerung nötig sind, angesteuert werden können. So wird z.B. der Sensor zur Messung der Sonnenwinkel mit Hilfe dieser Schnittstellen ausgelesen und zur Regelung der Sonnennachführung genutzt. Des weiteren verfügt die Interfacekarte über eine Schnittstelle zum Auslesen der Sensordaten und weiteren Statusinformationen, damit auch von Seiten des IPC's auf externe Ereignisse reagiert werden kann. So kann z.B. die Regelung des DSP unterbrochen und ein anderer Betriebsmodus aktiviert werden.

Die folgende Abbildung (5.7) soll den schematischen Aufbau der Motorsteuerung verdeutlichen:



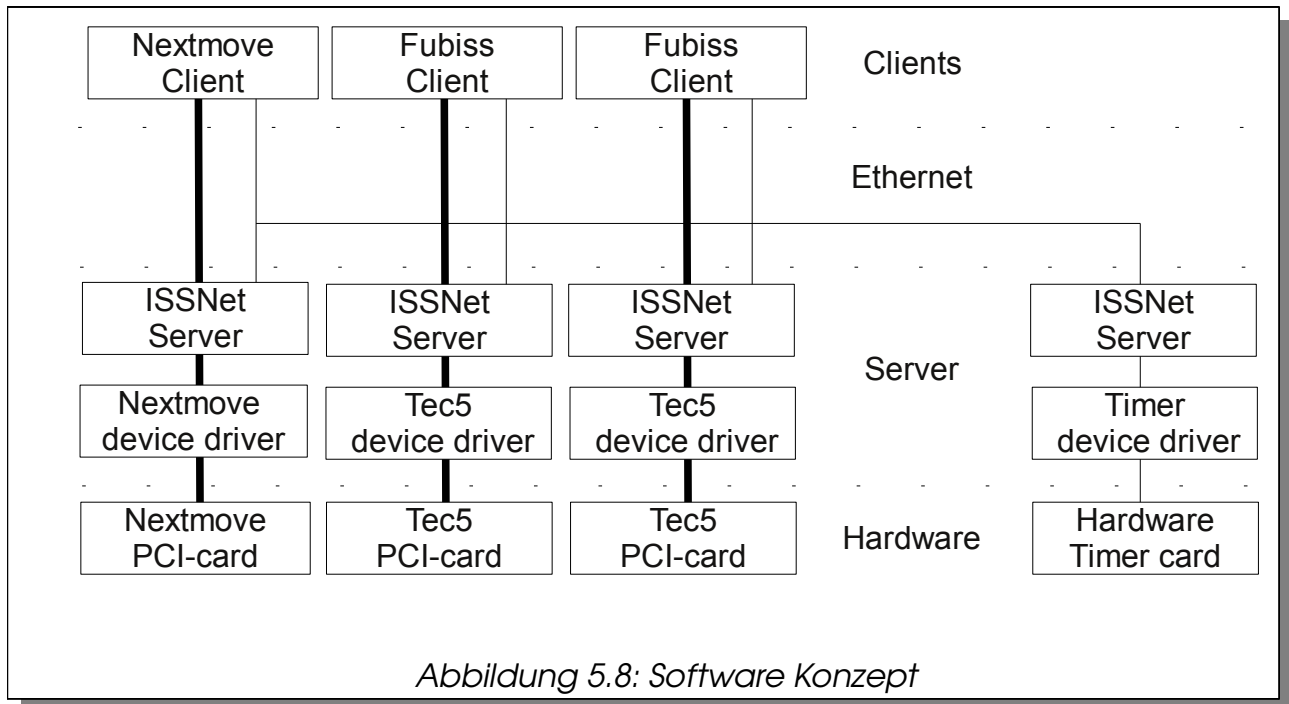
Die Motorsteuerung kann bis zu 12 Achsen ansteuern. Im vorliegenden Fall werden zunächst nur jeweils zwei Achsen für Sonnenphotometer (FUBISS-ASA1) und Polarimeter (FUBISS-Polar) benutzt. Denkbar wäre eine zusätzliche Lagesteuerung für mobile Plattformen, um z.B. eine Basis-Montageplatte ständig in einer waagerechten Lage zu halten. Hierbei könnte die unter Umständen unterschiedliche Regeldynamik der einzelnen Achsen besser der Messung angepasst werden. Es ist z.B. denkbar, dass Bewegungen der Basisplatte unabhängig ausgeglichen werden, während mit dem Polarimeter eine „principal plane“ Messung mit einer konstanten Messgeschwindigkeit erfolgen soll. Aus diesem Grunde kann für den mobilen Einsatz eine getrennte Regelung der Lage der Basis-Montageplatte nötig werden. Dies hätte zudem den Vorteil, dass der gemessene Elevationswinkel auch dem wirklichen Sonnenstand entsprechen würde und damit auch der Azimut leichter bestimmbar wäre.

Die Motorsteuerung verfügt über zusätzliche Schnittstellen zur Ansteuerung von externen Sensoren. Dies dient z.B. zur Erfassung von Endlage-Schaltern und auch zur Messung von analogen Spannungen. In unserem Fall ist eine 4-Quadranten-Diode zur Erfassung der Sonnenposition mit einer dieser Schnittstellen verbunden. Mit dieser Diode kann somit die Abweichung der aktuellen Motorposition zur gewünschten Sonnenposition gemessen und entsprechend nach geregelt werden.

Die Messgerätesteuerung wird von dem IPC übernommen, der auch für die Motorsteuerung zuständig ist. Die Software wird dabei in einem Client/Server Konzept realisiert. D.h. jede Hardware erhält ein Server-Programm, mit dem es möglich ist, die jeweilige Hardware anzusprechen. Es können getrennt vom Messsystem über ein Ethernet-Interface Befehle an die Hardware gesendet und zur Ausführung gebracht werden. Außerdem ist es für die einzelnen Server möglich, mit anderen Servern zu kommunizieren um abhängig von externen Ereignissen oder

synchronisiert zu bestimmten Zeiten Aktionen durchzuführen. Dieser Mechanismus dient auch zur Ermittlung einer einheitlichen systemweiten Uhrzeit.

Die folgende Abbildung 5.8 zeigt eine beispielhafte Realisierung eines Client/Server Konzeptes:



In der Abbildung 5.8 sind drei unterschiedliche Client-Programme zur Steuerung der Hardware abgebildet. Hierbei agieren alle drei unabhängig voneinander und können mit Hilfe des zusätzlich vorhandenen Time-Servers zeitlich eindeutig zugeordnet werden. D.h. es ist z.B. für eine spätere Auswertung möglich eine Spektralmessung, einer zu diesem Zeitpunkt aktuellen Motorposition zu zuordnen. Innerhalb eines asynchronen, dynamischen Systems müssen hierfür Zwischenwerte interpoliert werden. Grundlage dieser Zuordnung ist auch die jederzeitige Abfragemöglichkeit eines Zustandes der einzelnen Server und die Speicherung dieser Information. Dazu kann entweder in ausreichend kleinen, festen Zeitschritten der Zustand eines jeden Servers gespeichert oder von einem anderen Server die

Information abgefragt und gespeichert werden. Auch eine kombinierte Methode aus beiden ist denkbar, da prinzipiell jeder Server von mehreren Clients bzw. auch Servern angesprochen werden kann.

Bei FUBISS-Polar wird der aus den Messungen errechnete Stokes-Vektor aus vier simultan gemessenen Strahldichten ermittelt (Formel 2.38). Die gleichzeitige Messung minimiert, wie schon vorher beschrieben, den Fehler durch atmosphärische Änderungen während der Messung. Die Anzahl der unterschiedlichen Polarisationswinkel wurde auf vier festgelegt, um zum einen eine gewisse Redundanz (Bösche 2002) in der Berechnung des Stokes-Vektors zu erreichen und zum anderen auch eine einfachere Berechnung der einzelnen Komponenten des Stokes-Vektors zu ermöglichen. Im Gegensatz zu Messungen mit nur drei Polarisationswinkeln (Preusker 1995) (meist mit 0° , $+120^\circ$ und -120°) benötigt das Errechnen der Komponenten I, Q und U bei der Messung mit vier Polarisationsebenen (0° , 45° , 90° und 135°) im optimalen Fall jeweils nur zwei Strahldichtewerte. Ein weiterer Grund ist die Lage des Polarisationswinkels in der *principal plane* der Sonne. Er beträgt in der Regel 90° relativ zur Ebene der *principal plane*. Abweichungen von 90° weisen auf eine nicht optimale Messgeometrie (Ausrichtung der Basisplatte) während der Messung oder einer verstellten optischen Justage der Polarisationsebenen hin. Dies gilt allerdings nur unter optimalen Bedingungen, wie noch später gezeigt wird. Bei klarer Atmosphäre ist die gemessene Strahldichte in der Polarisationsebene 90° also am größten und somit ergeben sich niedrige Messzeiten und ein hohes Signal zu Rausch Verhältnis in der Berechnung von I und Q. Gleichzeitig ermöglicht diese Auswahl bei der Berechnung von U ein maximales Signal der beiden Komponenten für die Polarisationsebenen 45° und 135° . Diese müssen bei exakter Justierung und Ausrichtung in der *principal plane* gleich groß sein. Diese Auslegung eines für den mobilen Einsatz ausgelegten Instrumentes kommt die nachträglich mögliche Auswertung der Messgeometrie und das optimierte Signal/Rausch Verhältnis also sehr entgegen.

Im Folgenden werden die Prozeduren und Labormessungen zur Erstellung der Kalibrations-Koeffizienten, der Offset-Korrektur und der Kalibration für das FUBISS-System (Ruhtz et al. 1999b) und FUBISS-Polar erläutert. Dazu wird kurz zur Übersicht die prinzipielle Vorgehensweise zur Kalibration von Strahlungsmessgeräten im Bereich der optischen Fernerkundung vorgestellt und einige Informationen zur Durchführung gegeben.

Die prinzipielle Einbindung von Navigationsdaten, Zusatzdaten wie Daten der Motoransteuerung und die Zeitsynchronisation (level0b) sind hier der Vollständigkeit halber mit angegeben und werden hier aber nicht näher betrachtet. Die weitere Prozessierung nach Level 0b von FUBIS-ASA1 und 2 wird in den Arbeiten von Asseng (2002), Zieger (2006) und Bismarck (2009) beschrieben. Sämtliche Software Routinen sind in einer IDL (*Interactive Data Language*) FUBISS-Library zusammengefasst.

Prinzipielle Vorgehensweise FUBISS Daten-Prozessierung:

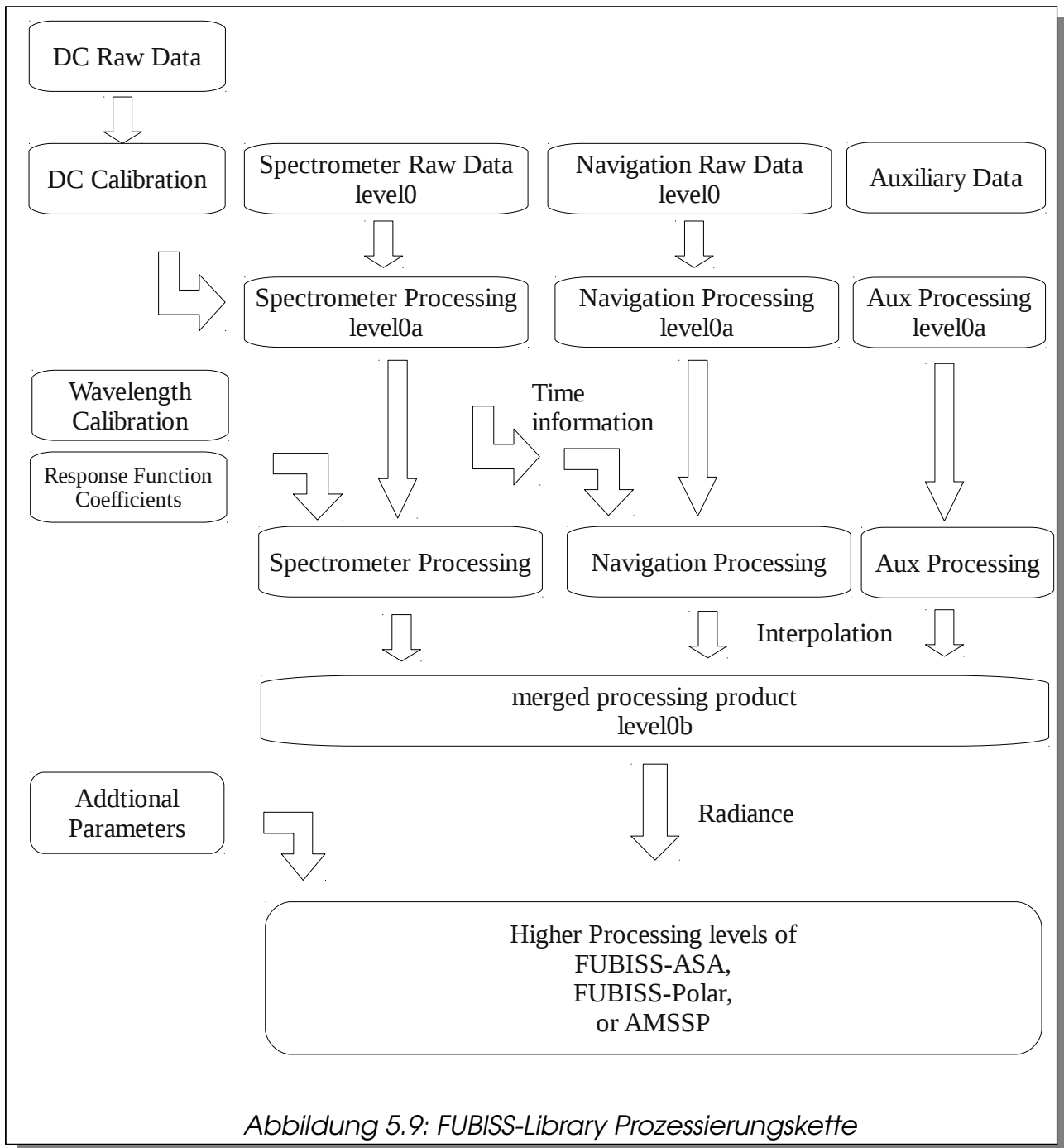


Abbildung 5.9: FUBISS-Library Prozessierungskette

5.4.1. Die Dunkelstrom-Messung (DC-Kalibration)

Ausgehend von den verwendeten Spektrometern (Zeiss MMS, MCS und NIR) beginnt in der Regel jede Messung mit sogenannten Dunkelstrom-Messungen (Ruhtz et al. 1999b). Bei diesen Messungen werden die Offsets der Spektrometer-Detektoren und deren Elektronik ermittelt. Der Name Dunkelstrom begründet sich aus der Messzeit abhängigen Signalgröße die auch ohne Lichteinfall auf den Detektor des Spektrometers entsteht. Die Vorgehensweise der Messung (DC-Kalibration) ist für alle Spektrometer der vorher genannten Typen gleich. Dazu wird der Lichteinfall der jeweiligen Einkoppeloptik mit entsprechenden Kappen oder automatischen *Shuttern* (*Verschlüssen*) abgedeckt und mit verschiedenen Messintervallen, den sogenannten Integrationszeiten Messungen durchgeführt. Aus diesen lässt sich durch Interpolation bzw. Extrapolation der elektronische Offset und der Dunkelstrom-Offset in Abhängigkeit von der Integrationszeit bestimmen. Der Dunkelstrom ist meist abhängig von Detektormaterial, Messzeit und Temperatur. Die ermittelten Offset Koeffizienten werden als *DC-coefficients* gespeichert und im Prozessierungsschritt *level0a* als Korrekturfaktor verwendet.

5.4.2. Die Wellenlängen-Kalibration

Die Ermittlung der Koeffizienten zur Wellenlängenkalibration eines Spektrometers wird meist mit verschiedenen Lampen, die ein spezifisches Linienspektrum abgeben, vorgenommen (Ruhtz et al. 1999 b). Mit der Identifikation und Gauss-Interpolation einzelner Linien lassen sich so über den gesamten Spektralbereich eines Spektrometers Wellenlängenzuordnung und Halbwertsbreite der einzelnen Detektoren eines Detektor-Arrays (Pixel) bestimmen. Es werden zur weitergehenden Bestimmung der Wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit einzelner Detektoren eines Arrays hochauflösende Monochromatoren eingesetzt. Dies wird in der Regel aber erst bei höher auflösenden Spektrometern und bei hochauflösenden Messungen in atmosphärischen Absorptionsbanden benötigt. Für abbildende Spektrometer spielen hier ausserdem noch der sogenannte *Smile* und *Keystone*-Effekt eine Rolle. Bei eindimensionalen Detektorarrays, wie im Falle der für das FUBISS-System eingesetzten Spektrometer kann dieser vernachlässigt werden, da die Effekte deutlich kleiner als die Wellenlängen Auflösung einzelner Pixel ist. Für abbildende Spektrometer wie das Satelliteninstrument MERIS müssen diese Effekte berücksichtigt werden.

5.4.3. Bestimmung der spektralen Detektor-Empfindlichkeit

Die Bestimmung der spektralen Detektor-Empfindlichkeit kann relativ oder absolut erfolgen. Bei der absoluten Bestimmung wird je nach Einkoppeltyp der Spektrometer meist ein Strahldichtenormal, das heißt z.B. eine Ulbrichtkugel verwendet. Für Globalstrahlungseinkopplungen werden Strahlstärkenormale eingesetzt. Diese können mit Hilfe von Reflektionsstandards auch als Transferstandard für Ulbrichtkugeln eingesetzt werden. Unter einer Relativkalibration versteht man die Bestimmung der relativen Empfindlichkeitsdifferenz zwischen zwei verschiedenen Spektrometern gleichen Typs und gleicher optischer Einkopplung. Diese Differenz kann sehr viel genauer bestimmt werden, da sie unabhängig vom verwendeten Strahldichtenormal ist. Die genaue Kenntnis der absoluten spektralen Strahldichtewerte für eine Lampe sind für diese Art der Kalibrierung nicht nötig und es muss keine Interpolation von Zwischenwerten für den gesamten Spektralbereich eines Spektrometers durchgeführt werden. So kann z.B. im Falle der Bestimmung von Polarisationsseigenschaften wie Polarisationsgrad und -winkel auf die Absolutkalibration verzichtet werden.

5.4.4. Bestimmung der Polarisations- Kalibrationsfaktoren

Im Folgenden werden die weiteren Prozessierungsschritte für die Berechnung von polarisationsabhängigen Kalibrationsgrößen beschrieben. Hierbei wird von mehreren Einkoppeloptiken, wie der vier Einkoppeloptiken von FUBISS-Polar ausgegangen. Diese wurden, wie vorher beschrieben, im level0b Prozessierungsschritt relativ kalibriert und somit auf ein Strahldichtenormal oder auf die Messwerte einer Einkoppeleinheit normiert. Die vier jeweiligen optischen Einkoppelzweige und Spektrometer sollten somit nur noch von ihren leicht unterschiedlichen Wellenlängenzuordnungen und der Polarisation abhängen. Die Wellenlängenzuordnungen werden durch Interpolation auf den Mittelwert für alle Spektrometer harmonisiert. Die Polarisationskalibration bezieht sich auf die Stellung der Polfilter. Diese Winkel müssen vorher im Labor bestimmt worden sein. Ausgehend von den FUBISS-Polar Filterstellungen (0°, 45°, 90°, 135°) wurden die Winkel relativ zu einem Labor-Polfilter gemessen. Dieser Labor-Polfilter definiert die Referenzwinkalebene für die Messung des Polarisationswinkels des Instrumentes und sollte somit möglichst genau an die gewünschte Messgeometrie ausgerichtet werden. Die Polfiltereinstellung der Einkoppeloptik wird mit Hilfe verschiedener vorgegebener Winkelstellungen des Referenzfilters ermittelt. Dazu werden aus der sich ergebenden Kurve mit Hilfe der folgenden vorgegeben Funktion die jeweiligen Konstanten berechnet:

$$\theta(x) = a_0 + a_1 \cos(a_2 * (x - a_3))^2 \quad (5.1)$$

mit a_0 = offset, a_1 = Amplitude, a_2 = Motorfaktor, a_3 = Winkel.

Für die gezeigten Auswertungen mit Messungen von FUBISS-Polar aus dem Jahre 2005 ergeben sich als Ergebnis folgende polarisationsabhängigen Kalibrationswerte und Polfilterstellungen. Die Werte wurden mit Hilfe eines

Levenberg-Marquardt Optimierungsverfahrens ermittelt:

Einkoppeloptik	0°	45°	90°	135°
Spektrometernr.	8864	8865	8867	8868
a0 (offset)	0.00024498	0.00017611	0.00012148	-0.00012148
a1 (Amplitude)	0.99730296	1.0030224	1.0017636	1.0026145
a2 (Motorfaktor)	0.99686230	0.99995358	0.99837519	1.0009222
a3 (Winkel)	3.1310921	48.002215	88.152121	-41.638952
Chi-Square	4.1702423	0.70468045	0.63767810	1.1955472

Mit der Formel (2.34) aus Kapitel (2.0) folgt ein lineares Gleichungssystem, dass mit Messungen in mindestens drei verschiedenen Polarisationswinkeln und der Annahme $\delta=0$ ($\Rightarrow V = 0$) gelöst werden kann.

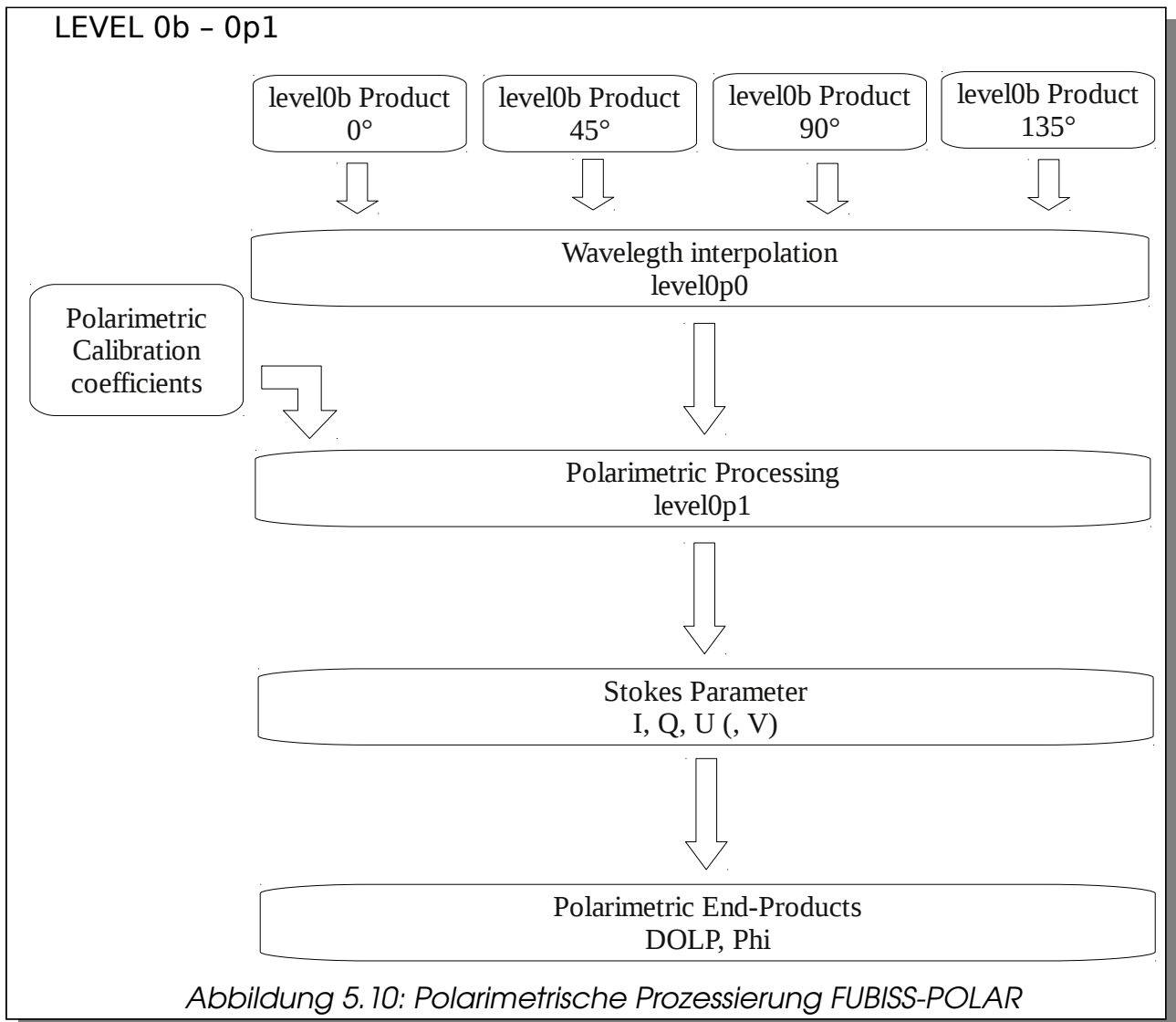
$$I_{meas}(\theta; \delta) = \frac{1}{2} (I + Q \cos 2\theta + U \cos \delta \sin 2\theta + V \sin \delta \sin 2\theta)$$

Mit Hilfe einer Pseudo-Inversen Matrix lassen sich aus diesen drei Messungen die Stokes-Parameter I, Q und U und gegebenenfalls bei bekannten δ und mindestens vier Messungen (mit Verzögerungsplatte) auch V berechnen.

Anmerkung:

Die folgende Prozessierungskette unterscheidet sich von der Prozessierung für AMSSP-EM, da im Falle von FUBISS-POLAR keine weiteren optischen Komponenten, wie z.B. Verzögerungsplatten verwendet wurden. Eine weitergehende Beschreibung für die Prozessierung von AMSSP-EM erfolgt nicht in dieser Arbeit, da diese erst nach Fertigstellung des Gesamtsystems vollständig abgeschlossen sein wird.

Die folgende Skizze (5.10) gibt eine Übersicht über die weiteren Prozessierungsschritte für FUBISS-Polar:



Im folgenden werden bodengestützte *principal plane* Messungen mit FUBISS-Polar aus dem Jahre 2005 und 2007 vorgestellt. Diese wurden an verschiedenen Tagen, mit meist wolkenlosem Himmel auf dem Messturm des Meteorologischen Institutes der Freien Universität und im Schneeferner Haus auf der Zugspitze und an der Koldewey Station in Spitzbergen gemessen. Die nächste Abbildung zeigt qualitativ einen typischen *principal plane scan* für einen Sonnenstand von etwa 42° und einer Wellenlänge von 400 nm. Der Abstand zum Polarisationsmaximum (bei 130°) beträgt danach 88°.

DOLP [%]
Degree of Polarisation [°]

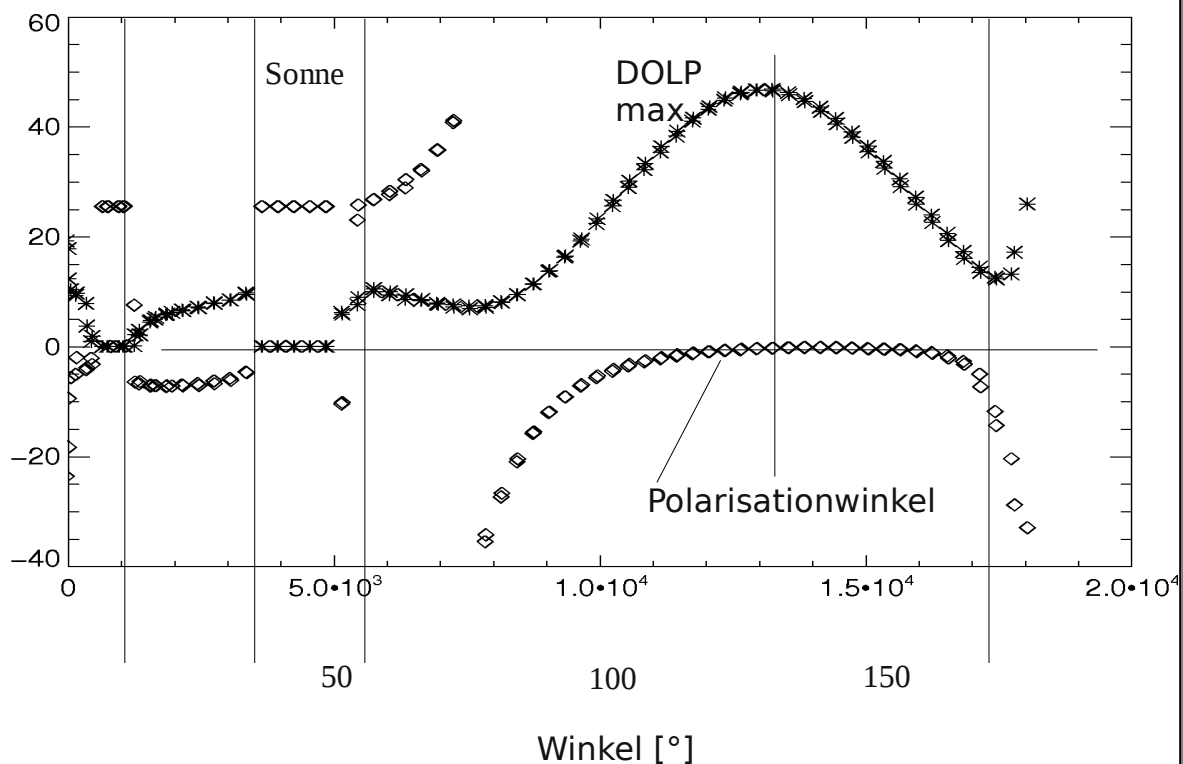
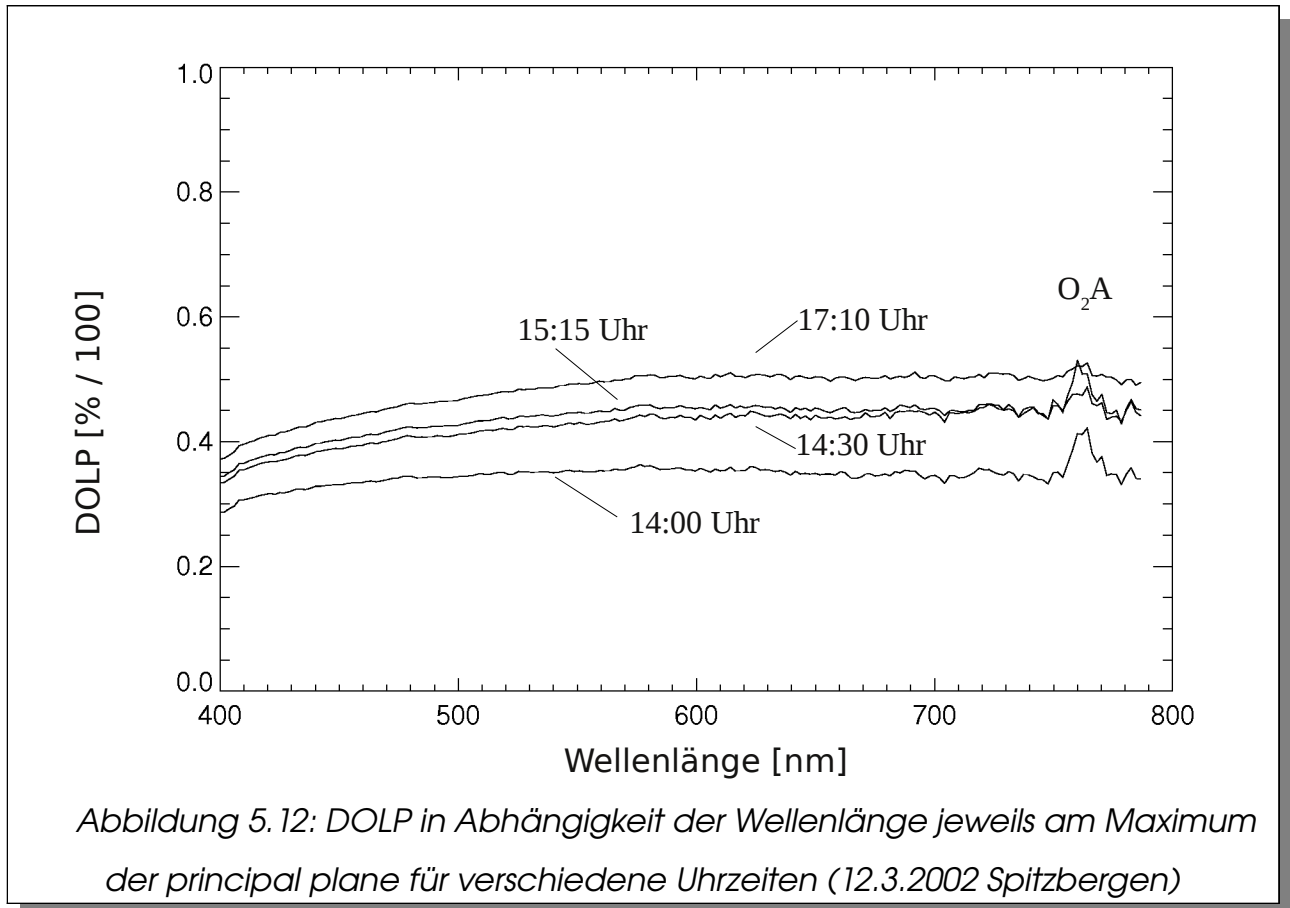


Abbildung 5.11: DOLP und Polarisationswinkel in der Principal Plane (0-180°)

In diesem Beispiel sieht man, dass sich für größere Polarisationsgrade in der *principal plane* ein Polarisationswinkel von etwa 0° einstellt. Dies entspricht relativ zur waagerechten Referenzebene 90° in der *principal plane*. Die Polarisationswinkel in Richtung Sonne können aufgrund der Übersteuerung des Gerätes nicht bestimmt werden. Für kleinere Polarisationsgrade (<15%) läuft der Winkel gegen negative Winkel. Ein Grund hierfür ist die Nicht-Bestimmbarkeit des Winkels im Falle der neutralen Punkte. Für Messrichtungen mit Elevationswinkel kleiner 10° und größer 170° kommt es aufgrund von Reflexionen der Messumgebung außerdem zu Verfälschungen des Messergebnisses.

Auf der nächsten Abbildung (5.12) wird die spektrale Abhängigkeit des Polarisationsgrades für mehrere Uhrzeiten gezeigt. Dieser zeigt qualitativ geringe Unterschiede im spektralen Verlauf. Im Bereich der Sauerstoffbande (O₂A) sieht

man hingegen den unterschiedlichen Einfluss der Mehrfachstreuung in Verbindung mit der hohen Albedo und dem niedrigen Sonnenstand in Spitzbergen bei verschiedenen Uhrzeiten.



Die nächste Abbildung (5.13) zeigt die jeweiligen Maxima und Minima des DOLP einer Messung bei Sonnenaufgang (Zugspitze 2007).

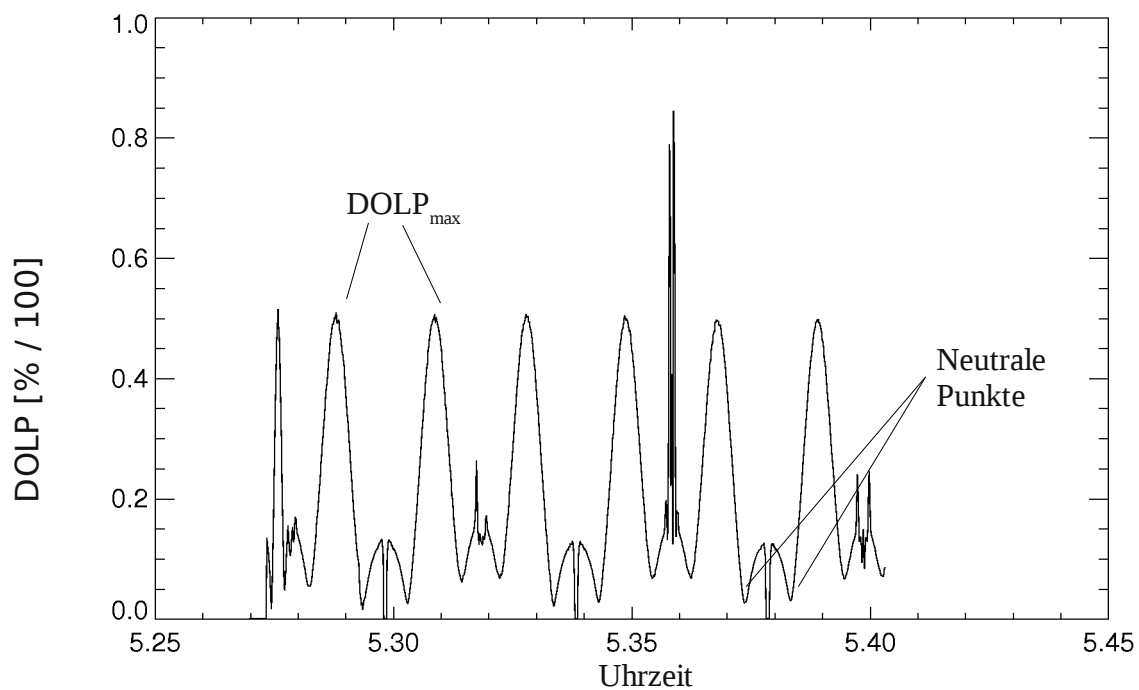


Abbildung 5.13: Mehrere *principal plane* Scans gemessen bei Sonnenaufgang für die Wellenlänge 589 (nm) (27.3.2007 Zugspitze)

Abbildung 5.14 und 5.15 zeigen den linearen Polarisationsgrad (DOLP) der *principal plane* Messungen für eine Wellenlänge bei 589 nm für zwei verschiedene Tage. Die Messungen wurden in Berlin auf dem meteorologischen Messturm der Freien Universität Berlin durchgeführt. Man sieht, dass die Tagesgänge des Polarisationsgrades (DOLP) vom Zustand und der Änderung der Atmosphäre über den Tag abhängen. In Abbildung 5.14 bleibt der maximale DOLP am Vormittag bis auf Störungen zwischen 10.00 Uhr und 12.00 Uhr nahezu konstant. Danach fällt der Polarisationsgrad zum Nachmittag bis auf Werte um 35 %. Die Störungen der Messungen werden durch Aufbauten des Messturms hervorgerufen. Außerdem kann der Polarisationsgrad durch Zirren beeinflusst werden. In Abbildung 5.15 sinkt der Polarisationsgrad kontinuierlich über den Tag verteilt von etwa 45% auf 35%. Der Sonnenstand ist in den beiden Abbildungen jeweils oben rechts dargestellt und die unterschiedliche Lichtintensität hat auf die Höhe des maximalen Polarisationsgrades wenig Einfluss.

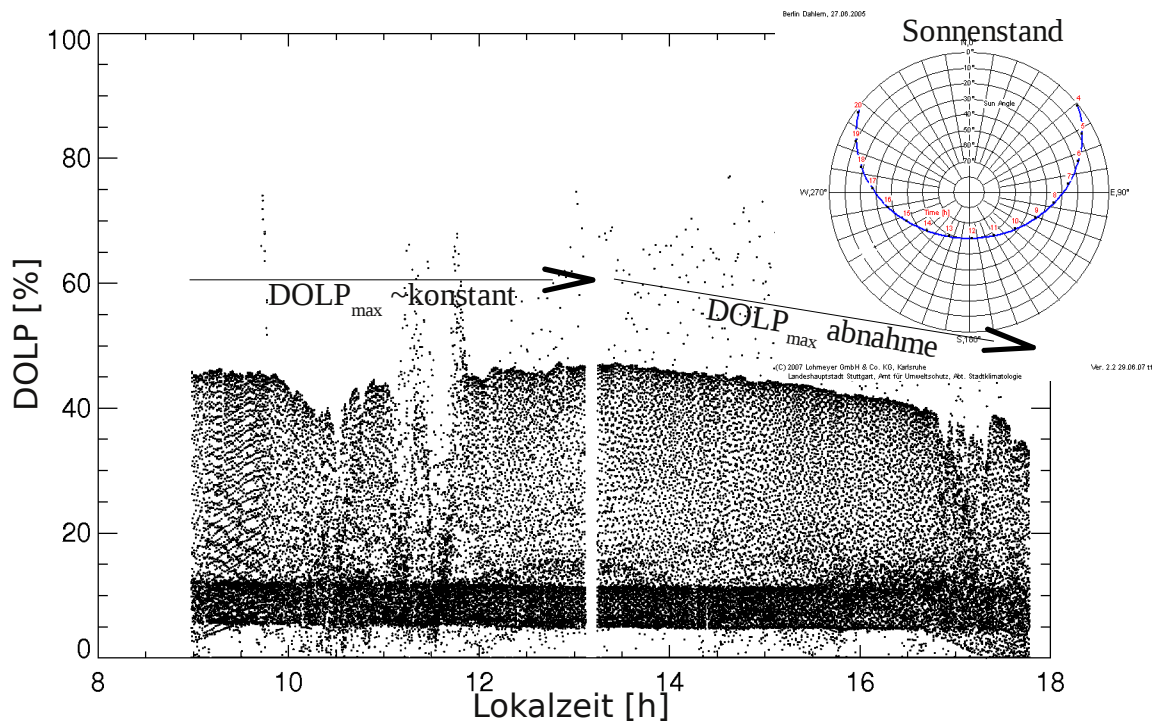


Abbildung 5.14: DOLP Tagesgang der principal plane Messungen vom 27.6.2005 für die Wellenlänge 589 (nm) gemessen in Berlin am FU Messturm

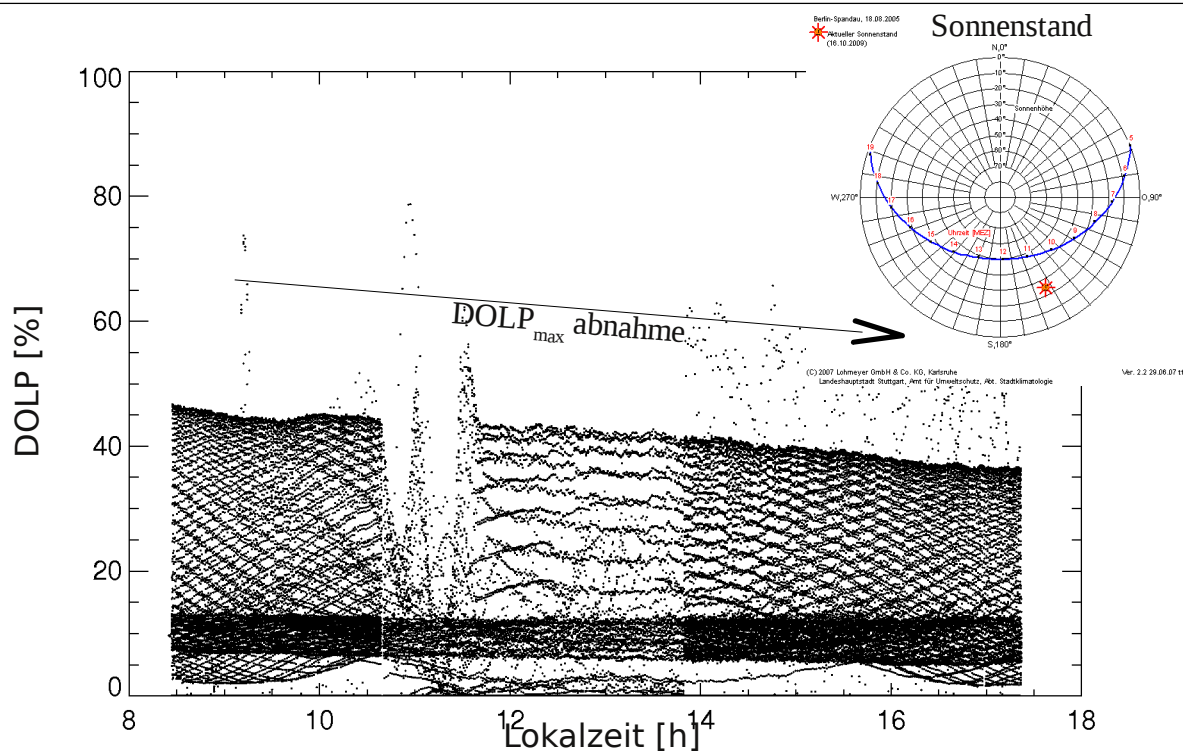


Abbildung 5.15: DOLP Tagesgang der principal plane Messungen vom 18.8.2005 für die Wellenlänge 589 (nm) gemessen in Berlin am FU Messturm

5.5. FUBISS-ASA2

In der Weiterentwicklung von Instrumenten für den mobilen Einsatz wurde zunächst ein weiteres flugzeuggestütztes Sonnenphotometer (FUBISS-ASA2) entwickelt (Zieger et al. 2007). Dieses besitzt außer einem schnellerem Antrieb eine zweite Aureolenöffnung. Die Winkelbereiche der Aureolen liegen bei 4° und 6° . Dies ermöglicht das Streuverhalten von



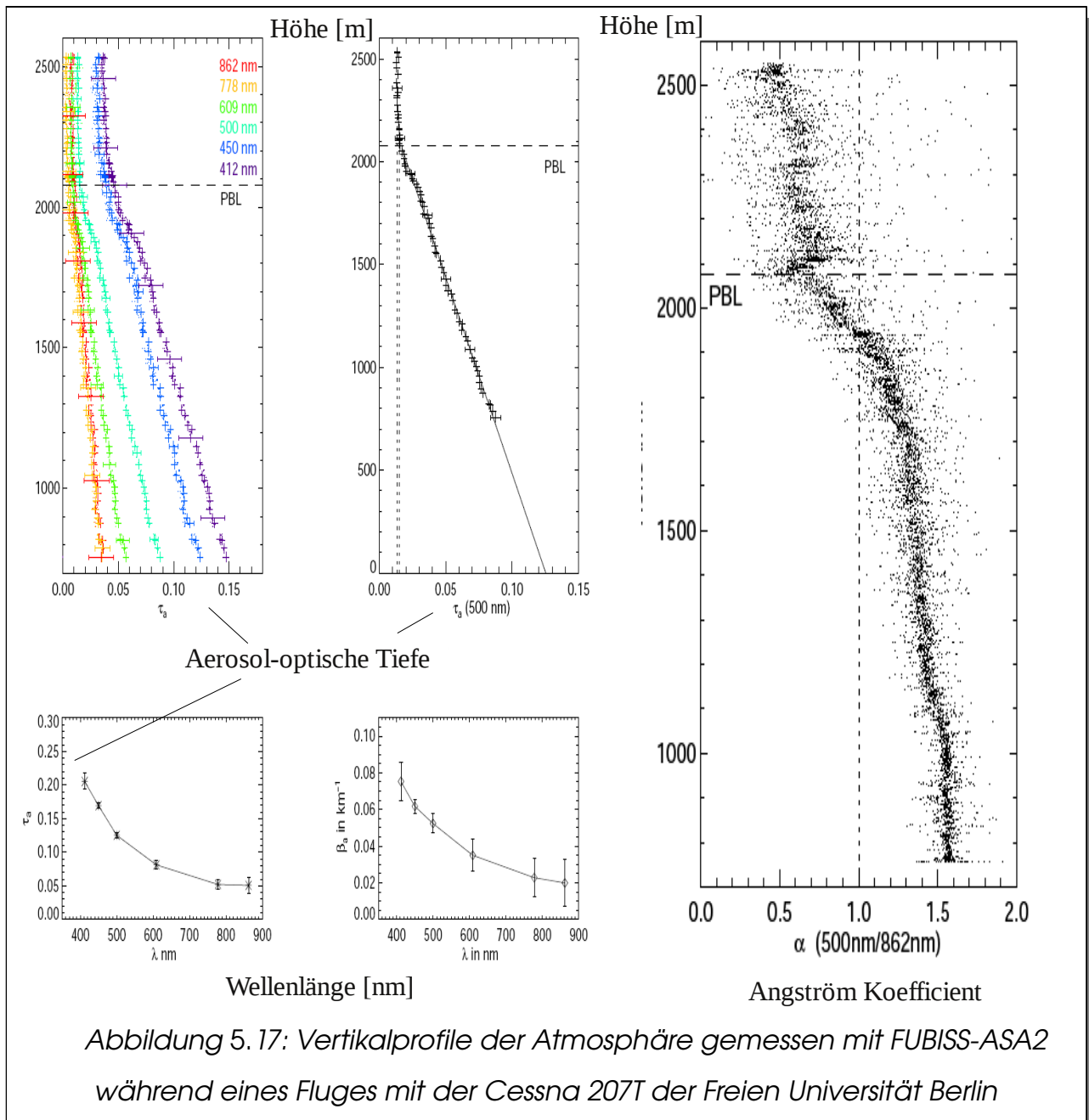
Abbildung 5.16: Einkoppeloptik FUBISS-ASA2

Aerosolen im Bereich der Vorwärtsstreuung der Sonne zu untersuchen. Einen weiteren Vorteil bietet die Integration der Spektrometer in den Einkoppelkopf. Dies verringert die Einflüsse der Glasfaseranbindung von Spektrometer und Einkoppeloptik und verhindert mögliche Beschädigungen im Feldeinsatz. Aufgrund der schnelleren Nachführung ist dieses System für den Einsatz im Flugzeug optimiert.

Beispielhaft wird in Abbildung 5.17 die Messung mit FUBISS-ASA2 und die daraus abgeleiteten Größen (hier hauptsächlich Aerosol-optische Tiefe und Ängström Koeffizient) gezeigt. Aus den Messungen der direkten solaren Strahlstärke, gemessen in verschiedenen Höhen, lässt sich ein Vertikalprofil der Aerosol-optischen Tiefe ableiten (siehe Abbildung 5.17 links oben für 6 verschiedene Spektralkanäle).

Man sieht in Abbildung 5.17 z.B. deutlich den Oberrand der planetaren Grenzschicht bei etwa 2100 m Höhe. Auf der linken Seite ist der aus den spektralen Steigungen (Abbildung 5.17 unten links) ermittelte Ängström Koeffizient abgebildet. Mit dem Ängström Koeffizient ist in vielen Fällen schon ein Aerosoltyp zuzuordnen,

da dieser von der Größe der Teilchen an denen das Licht gestreut wurde abhängt.



5.6. FUBISS-Zenith

Die Entwicklung von FUBISS-ASA2 wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Jonas von Bismarck um die Möglichkeit einer zusätzlichen Zenithstrahldichtemessung erweitert (Bismarck 2009). Damit konnte die Charakterisierung der in der Atmosphäre vorhandenen Aerosole weiter verbessert werden, da hiermit eine weitere Messrichtung zur Charakterisierung der gestreuten Sonnenstrahlung in der Atmosphäre zur Auswertung zusätzlich zu den beiden Aureolenöffnungen von FUBISS-ASA2 zur Verfügung steht.

5.7. URMS (*Universal Radiation Measurement System*)

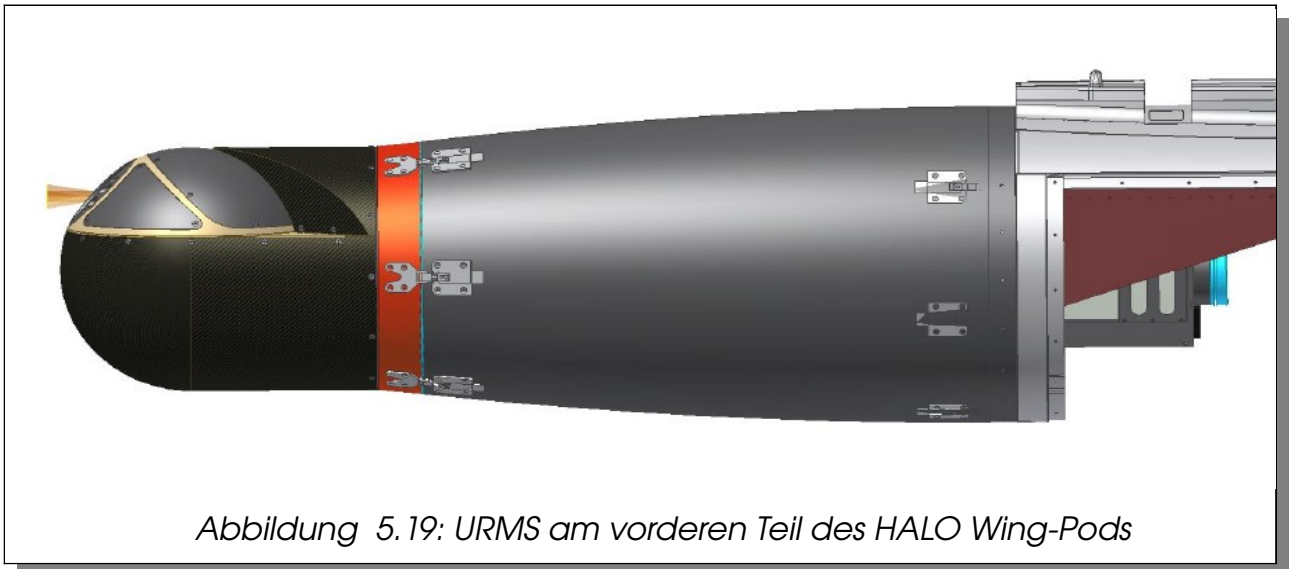
Der nächste Schritt in der Weiterentwicklung mobiler flugzeuggestützter Strahlungsinstrumente und den Erfahrungen aus den vorangegangenen Entwicklungen führte zur Entwicklung der universellen Strahlungseinkopplung URMS und des Instrumentes AMSSP. Dieses im Rahmen des Schwerpunktprogramms für das Forschungsflugzeug HALO (High Altitude LOng range research aircraft) von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderte Projekt hat das Ziel die Messung der gestreuten Sonnenstrahlung von HALO aus zu ermöglichen. HALO ist ein Forschungsflugzeug, das hauptsächlich für die Atmosphärenforschung angeschafft wurde. Es kann Missionen mit bis zu 3 Tonnen Messinstrumente bis in 15 km Höhe und mit einer Reichweite von bis zu 10.000 km durchführen. Das im Folgenden beschriebene Projekt soll mit Hilfe einer Einkoppeloptik in beliebige Messrichtungen und damit mit beliebigen Messgeometrien, die in der Atmosphäre gestreuten Sonnenstrahlung messen können. Das System soll die Möglichkeit



Abbildung 5.18: HALO mit Wing-Pod

bieten, Strahlungsmessungen gerichtet in beliebige Raumrichtungen durchzuführen. In der ersten Stufe wurde hier ein kombiniertes Sonnenphoto- und Polarimeter (AMSSP) vorgeschlagen.

Zur Realisierung dieser Forderungen wurde eine Optik im vorderen Teil eines HALO Wing-Pod vorgeschlagen. Abbildung 5.18 zeigt den Wing-Pod zusammen mit HALO. Dieser soll im vorderen Teil modifiziert werden. Dazu soll über ein verstellbares Spiegelsystem die Strahlung in den Wing-Pod geleitet werden. Abbildung 5.19 zeigt den Entwurf zum Zeitpunkt des CDR (Critical Design Review) kurz vor Beginn der Fertigung.



Der Vorteil dieses Designs ist, dass das optische Messsystem nur durch die Größe des Wing-Pods beschränkt ist und die beweglichen Teile auf ein Einkoppelsystem, in diesem Falle ein Spiegelsystem beschränkt bleiben. Andere Positionen z.B. am unteren Flugzeugrumpf, würden das Sichtfeld der Einkopplung stärker einschränken, als dies am Wing-Pod der Fall ist. Es könnten so auch nur Messungen in den unteren oder im Falle der Oberseite des Flugzeugrumpfes in den oberen Halbraum durchgeführt werden. Abbildung 5.20 zeigt die Positionen der Wing-Pods an HALO.

HALO Wing-Pod

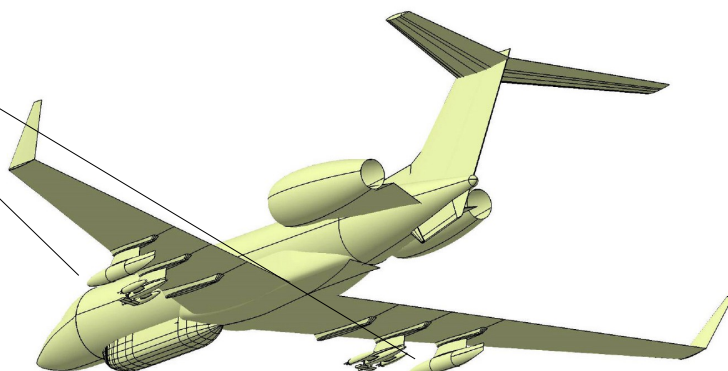


Abbildung 5.20: HALO, untere Flügelstationen

Abbildung 5.21 zeigt mögliche Messgeometrien bzw. Messrichtungen die mit dieser Art Einkopplung möglich sind.

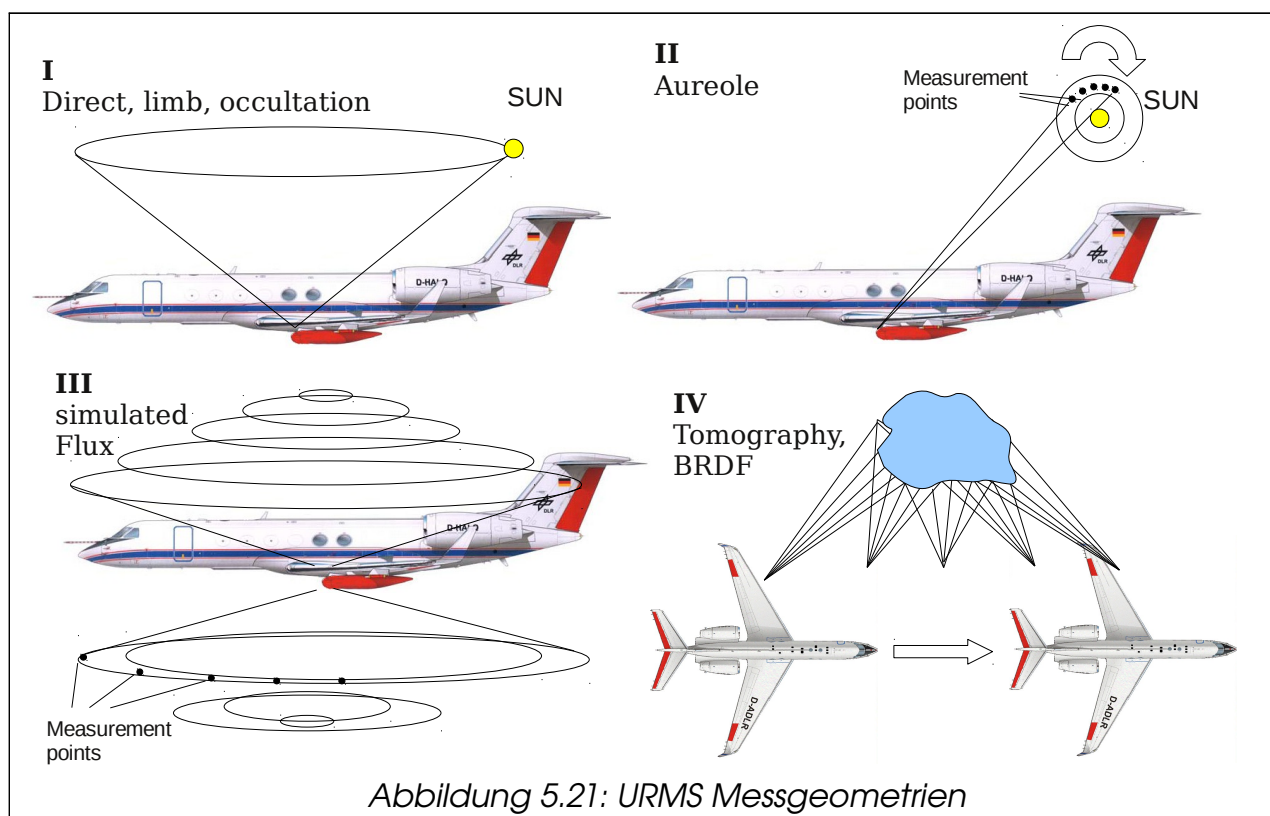


Abbildung 5.21: URMS Messgeometrien

Die Entwicklung einer Einkoppeloptik für den mobilen Einsatz erfordert, dass die jeweiligen Messgeometrien in möglichst kurzer Zeit nachzuführen sind. Die minimalste Anforderung für atmosphärische Messungen in der Auswahl der

Motorantriebe sollte eine mögliche Bewegung des Instrumentes im mobilen Einsatz von mindestens 10-20 ($^{\circ}/\text{sec}$) erreichen und Positionsänderungen in ca. 1 (sec) erreichen können. Dies entspricht in etwa der maximal vorkommenden Bewegung eines langsam fliegenden Kleinflugzeuges unter Messbedingungen. Für Messungen auf HALO wird eine sehr viel schnellere Motoransteuerung zum Einsatz kommen, da dieses bei einer Geschwindigkeit von 100-250 m/s erheblich schneller ist und in 1 (sec) größere Strecken zurück legt. Entsprechend wird hier eine Verstellgeschwindigkeit von bis zu 90 ($^{\circ}/\text{sec}$) vorgegeben. Positionen können dementsprechend schneller angefahren werden.

Eine in jede mögliche Richtung zum oberen und unteren Halbraum auszurichtende Einkoppeloptik benötigt mindestens zwei Achsen. Mögliche Realisierungen sind eine Doppelt-Kardanische-Aufhängung oder eine Strahlumlenkung mit Hilfe von zwei Spiegeln auf drehbaren Achsen.

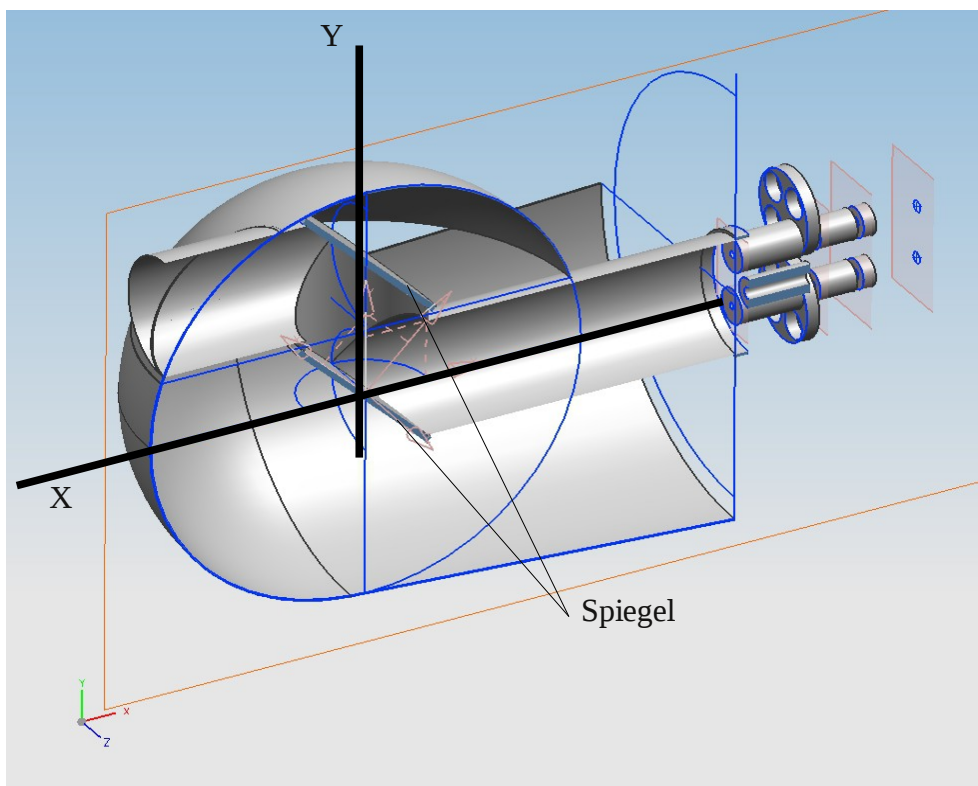


Abbildung 5.22: Konzeption HALO Wing-Pod und Strahlungseinkopplung

In Abbildung 5.22 sieht man das Konzept eines Wing-Pods in einer Schnittdarstellung. Man erkennt die Einkopplung und die beiden Antriebsachsen (X,Y), um die die Spiegel gedreht werden können. Damit wird es möglich, Licht aus nahezu beliebigen Richtungen durch die Drehung der beiden 45° Spiegel in den Wing-Pod einzukoppeln. Der Durchmesser des Strahls soll möglichst groß sein und etwa 100 mm betragen. Die Länge des optischen Weges wird durch den Einkoppelkopf begrenzt und gibt den maximalen Öffnungswinkel eines dahinter positionierten optischen Gerätes vor und sollte somit möglichst kurz sein. Es wird mit diesem Konzept ein maximaler Öffnungswinkel von etwa 10° FOV (Field of view) für ein optisches Gerät möglich sein.

Die Spiegelanordnung des Einkoppelkopfes hat aufgrund der konstanten 45° Winkel nur einen geringen Einfluss auf die Polarisations-eigenschaften des eingekoppelten Lichtes. Trotzdem muss dieser Einfluss spezifiziert werden, wenn mit dieser Einkopplung auch die Polarisations-eigenschaften des eingekoppelten Lichtes gemessen werden sollen. Die beste Möglichkeit ist hier, alle Stokes-Parameter von vornherein zu bestimmen. Diese können mit Hilfe der ermittelten Müller-Matrizen der optische Einkopplung korrigiert werden. Für die Bestimmung des vollen Stokes-Vektors werden mindestens vier Einkoppeloptiken mit Polarisationsfilter und Wellenplatte benötigt. Die optimalen Winkel für die Filterstellungen werden in der Arbeit von Hollstein et al. (2008) und Ruhtz (2009) beschrieben. Somit vergrößert sich nicht unbedingt der benötigte Platz für das optische Instrument, da die Anzahl der Einkoppeloptiken im Vergleich zu FUBISS-Polar konstant bleibt. Will man zusätzlich noch den direkten Pfad und in der Aureole der Sonne Messungen durchführen, so muss das einfallende Licht gegebenenfalls dem Dynamikbereich des Polarimeters, z.B. mit Hilfe eines Filterrades angepasst oder mit einer eigenen Einkoppeloptik realisiert werden.

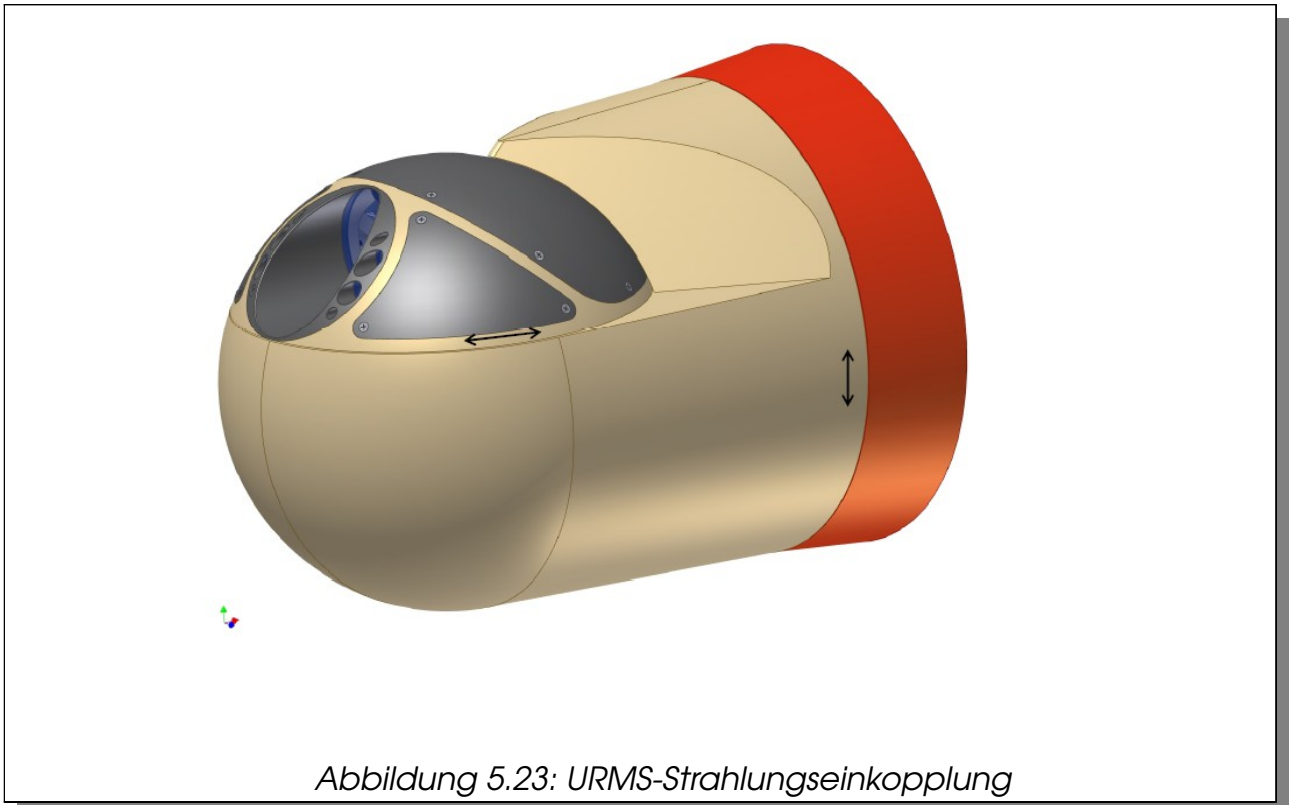
Der definierte Spektralbereich der vorher beschriebenen optischen Einkopplung

beschränkt sich auf den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (350 – 2400 nm). In diesem Spektralbereich messen die meisten Sonnenphotometer und es wird ein großer Bereich der in der Atmosphäre möglichen Anwendungen möglich sein. Die Auswahl der spektralen Auflösung wurde auch durch die verfügbaren und im Falle der FUBISS Geräteserie verwendeten MMS bzw. MCS-Spektrometer der Firma Zeiss bestimmt. Diese insbesondere für den mobilen Einsatz geeigneten und sehr kleinen Spektrometer gibt es in verschiedenen Ausführungen und Auflösungen. Es wurde der Spektralbereich des Polarimeters mit zunächst 250 - 780 nm und mit einer spektralen Auflösung von ca 7.5 nm (FWHM) gewählt. Ein optionaler Spektralbereich kann durch Austausch der Spektrometer erreicht werden. Diese erste spektrale Auflösung ist sicherlich ein Kompromiss und auf die Realisierbarkeit eines kleinen mobilen Instrumentes optimiert. In Zukunft wird dieser noch weiter optimiert und der jeweiligen Anwendung angepasst. Aufgrund des universellen Aufbaus ist ein Austausch der Spektrometer und die Anpassung auf einen spezifischen Spektralbereich jederzeit in der Planungsphase eines Experimentes möglich.

Der spektrale Bereich und der Einfluss der optischen Komponenten auf das Messobjekt sollte möglichst klein sein und für einen spezifizierten allgemeinen Spektralbereich optimiert sein. Die Möglichkeit des Austauschs der Einkoppelfenster und Spiegel soll eine Optimierung der Einkoppeloptik an zukünftige optische Messinstrumente ermöglichen. Der optische Weg wird über Blenden eine Streulichtunterdrückung besitzen. Die Spiegel sind justierbar, um die Einflüsse der Spiegel auf das eingekoppelte Licht zu minimieren.

Der Antrieb beider Achsen ist selbst hemmend und erfolgt mit einem Schneckenantrieb. So ist sichergestellt, dass im stromlosen Fall die Kopfposition starr mit dem dahinter liegenden Wing-Pod verbunden ist. Des weiteren können die unterschiedlichsten Momente während eines Messfluges auf die Antriebe wirken. Verursacht werden diese durch die umströmende Luft. Insbesondere das senkrecht

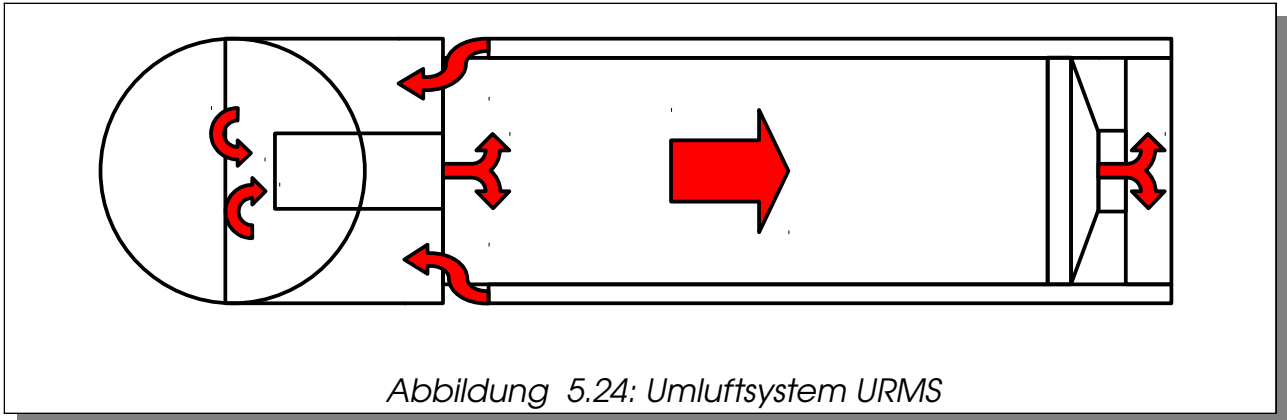
stehende und nach innen versetzte Strahl-Eintrittsfenster in der oberen Halbschale erzeugt ungleichmäßige Momente in Abhängigkeit seiner Position und Fluggeschwindigkeit. Das folgende Bild Abbildung 5.23 zeigt die optische Einkopplung mit Blickrichtung nach vorn. Die seitlichen Wände besitzen eine Streulichtunterdrückung.



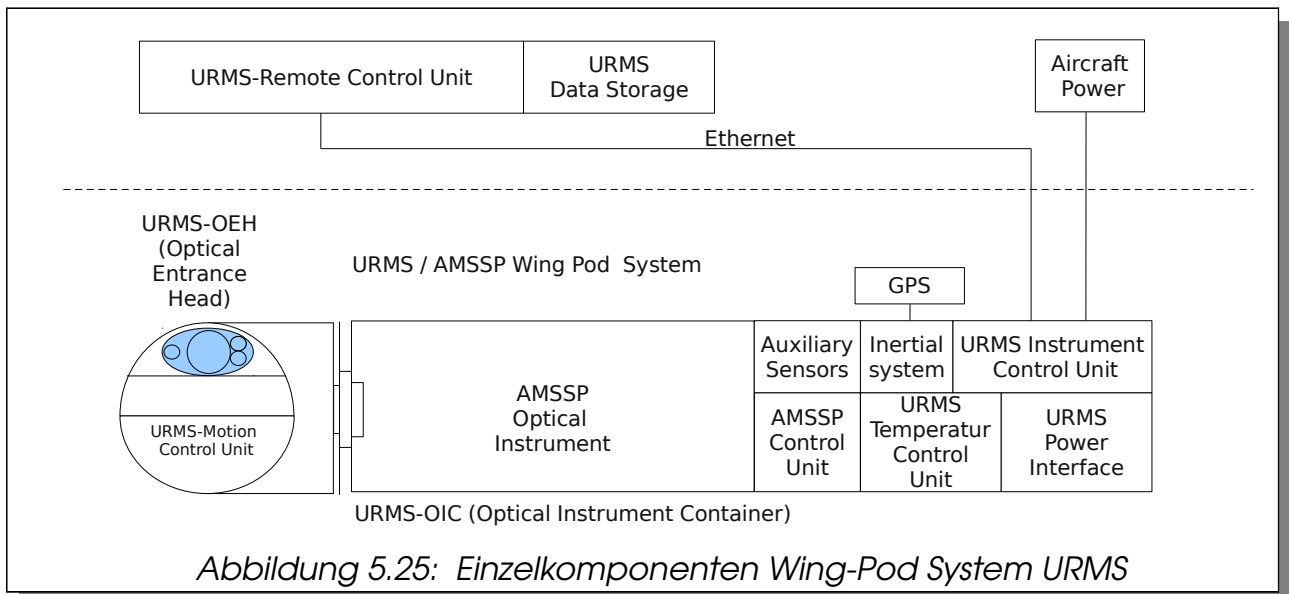
Das elektrische Interface erfolgt über Schleifringe, um eine kontinuierliche 360° Bewegung um die jeweiligen Achsen zu ermöglichen. Mit den Schleifringen soll eine ausreichende Stromversorgung und zwei USB-Verbindungen zum Kopf realisiert werden. Im Kopf kann ein *Embedded-PC* und eine Motoransteuerung die Regelung der Achsen und die Ansteuerung zusätzlicher Sensorik übernehmen. Diese werden über die USB-Verbindung mit der URMS-ICU (*Universal Radiation Measurement System – Instrument Control Unit*) verbunden. Eine gleiche Einheit wird für die zweite Achse verwendet.

Als zusätzliche Sensorik werden zum einen Analog-Sensoren (Temperatur, Druck, Feuchte), wie auch rechts und links des Einkoppelfensters je eine „Vier-Quadrantendiode“ und eine kleine Video-Kamera installiert. Auch für die obere Halbschale ist ein Schleifring zur Spannungsversorgung und Ethernet vorgesehen. Die „Vier-Quadrantendioden“ sind justiertbar.

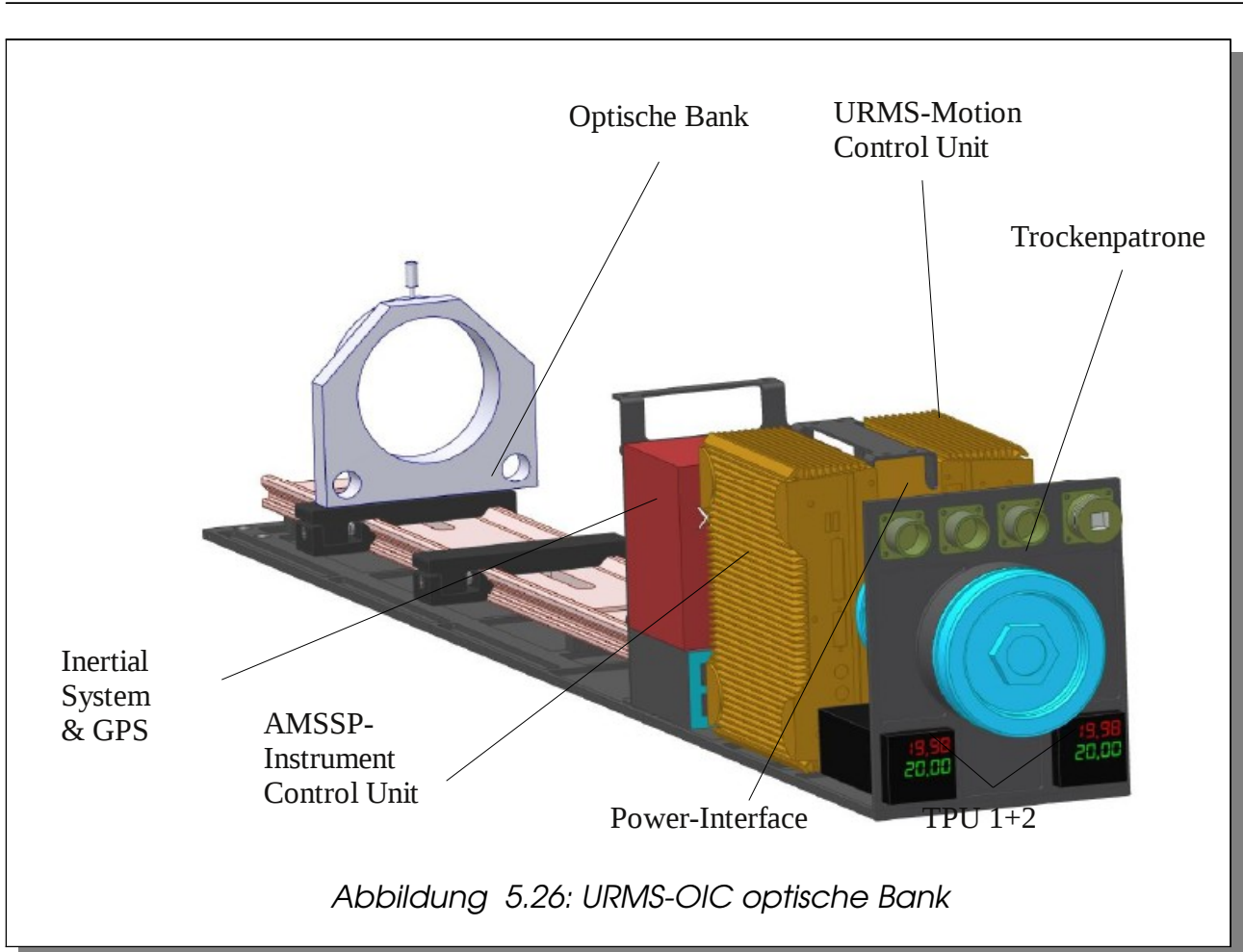
Der Betrieb der optischen Einkoppelung soll für einen Höhenbereich bis 15 km möglich sein. Abbildung 5.26 und 5.28 zeigen die Konzeption des optischen Gehäuses. Um die Kondensation von Luftfeuchtigkeit zu minimieren, soll der Einkoppelkopf zusammen mit dem Instrumenten-Container (URMS-OIC) als ein geschlossenes System mit kontrolliert getrockneter Außenluftzufuhr realisiert werden. Ein zusätzliches Kühl-/Heizsystem soll ein Beschlagen oder Einfrieren der optischen Komponenten verhindern und eine kontrollierte Temperatur unabhängig von der Außentemperatur sicherstellen. Das folgende Bild Abbildung 5.24 zeigt das Umluftsystem schematisch.



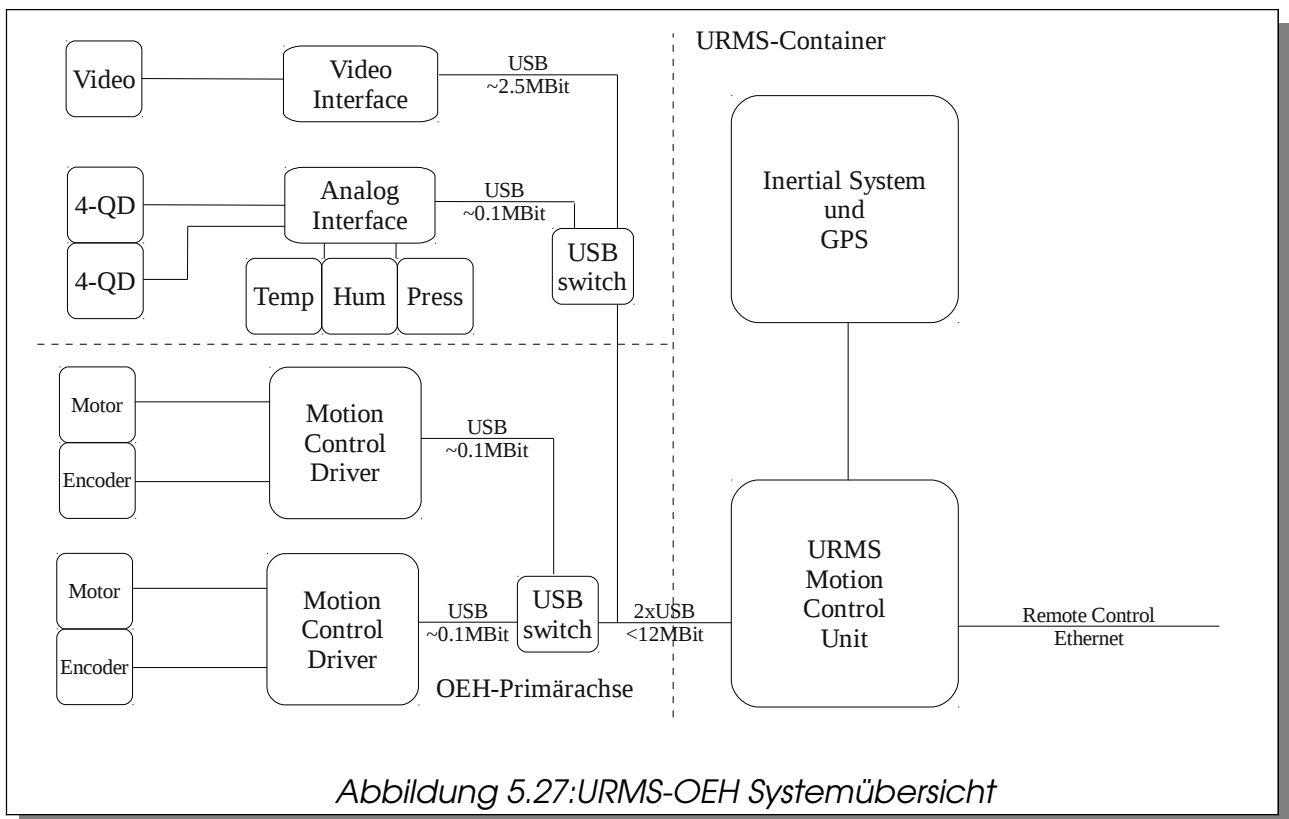
Das folgende Bild (Abbildung 5.25) zeigt den Aufbau und die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems:



Das Gesamtsystem besteht aus einer externen Steuerung (*Remote Control*) mit Datenspeicher und den URMS Komponenten. Dazu gehören mehrere Kontrolleinheiten. Eine Kontrolleinheit (URMS-Motion Control Unit) dient zur Ansteuerung der Motoren und des Inertial- und GPS-Systems. Eine zweite Steuerung (AMSSP-Instrument Control Unit) kontrolliert das optische Messgerät, die auch die Innentemperatur (TPU1+2: Temperature Control Unit 1+2) des Einkoppelkopfes und Instrumenten Container kontrolliert. Abbildung 5.26 zeigt das innere von URMS-OIC (*Optical Instrument Container*).



Die gesamte Auslegung der Elektronik und deren Softwarekomponenten sollten möglichst einfach in ein bestehendes Messsystem integrierbar und mit anderen Instrumenten kombinierbar sein. In Abbildung 5.27 ist eine Systemübersicht der Motor Kontrolleinheit zu sehen:



Die Ansteuerung der Motorkontrolleinheit erfolgt über eine Ethernet-Schnittstelle, damit das Gesamtsystem mit anderen externen Instrumenten gekoppelt oder ggf. synchronisiert werden kann. Dies ist so nur von der Kontrollsoftware abhängig. Auch die Kopplung vom internen optischen Instrument (AMSSP) erfolgt über diese Schnittstelle. Des weiteren werden die internen Messdaten (Temperatur, Druck, Feuchte, Motorpositionen, Video, Sonnenposition, Instrumentlage und Position usw.) über diese Schnittstelle bereit gestellt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Zeitanbindung des Systems an eine externe Zeitquelle. Dies kann z.B. die in einem GPS-System integrierte Zeit liefern.

Die folgenden Bilder (Abbildung 5.28, 5.29) zeigen das optische Gehäuse von URMS und die Abmessungen des Gesamtsystems.

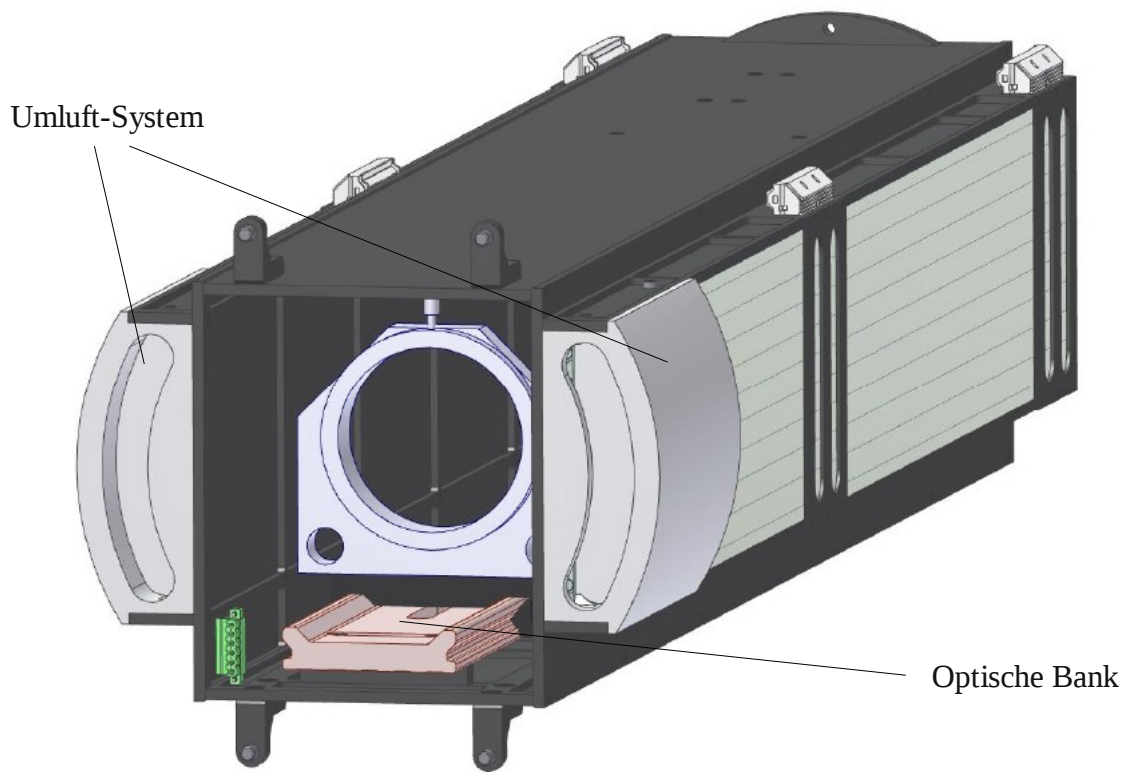


Abbildung 5.28: URMS-OIC Frontansicht (Optical Instrument Container)

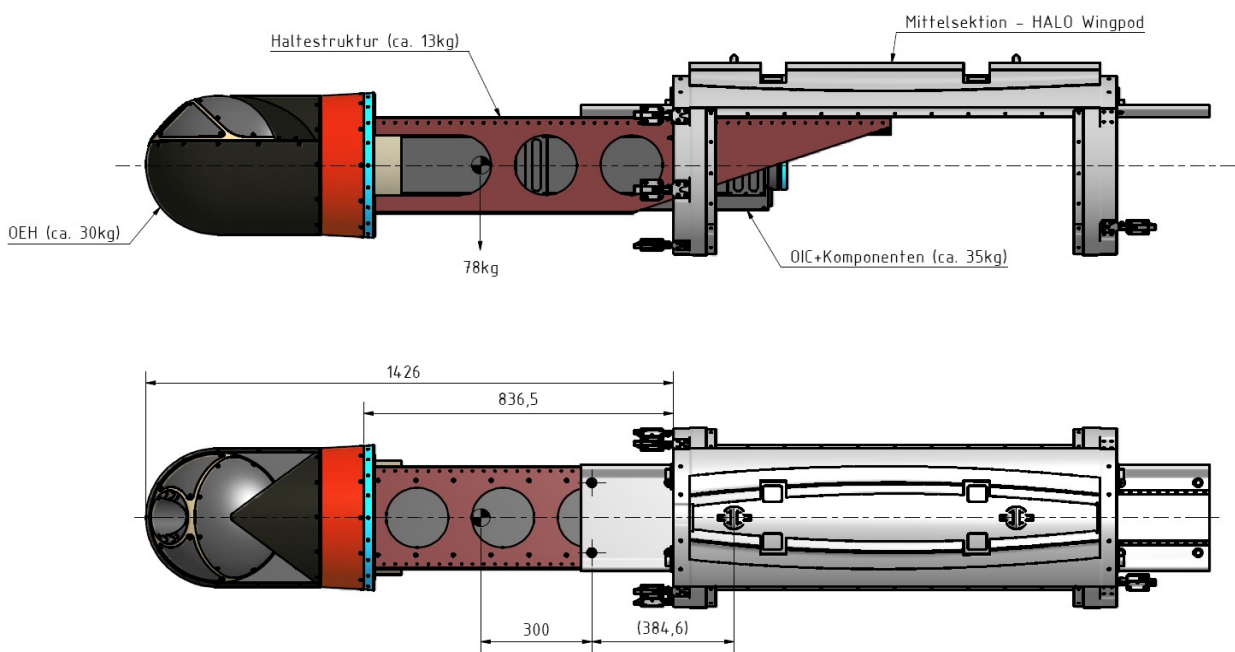


Abbildung 5.29: URMS mit Haltestruktur an Wing-Pod Instrumententräger

5.8. AMSSP (Airborne Multi-Spectral Sunphoto- and Polarimeter)

Das nächste Bild (Abbildung 5.30) zeigt AMSSP-EM (*Engineering Model*), das für die Tests der optischen Komponenten und der Entwicklung der Software als Vorstudie entwickelt wurde. Zunächst wurde das Polarimeter realisiert.

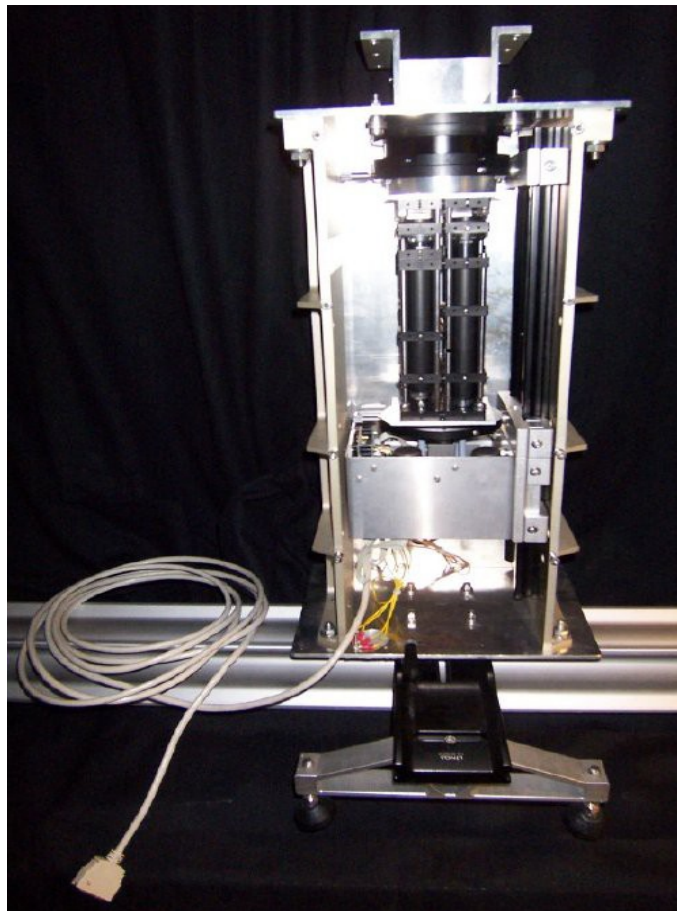
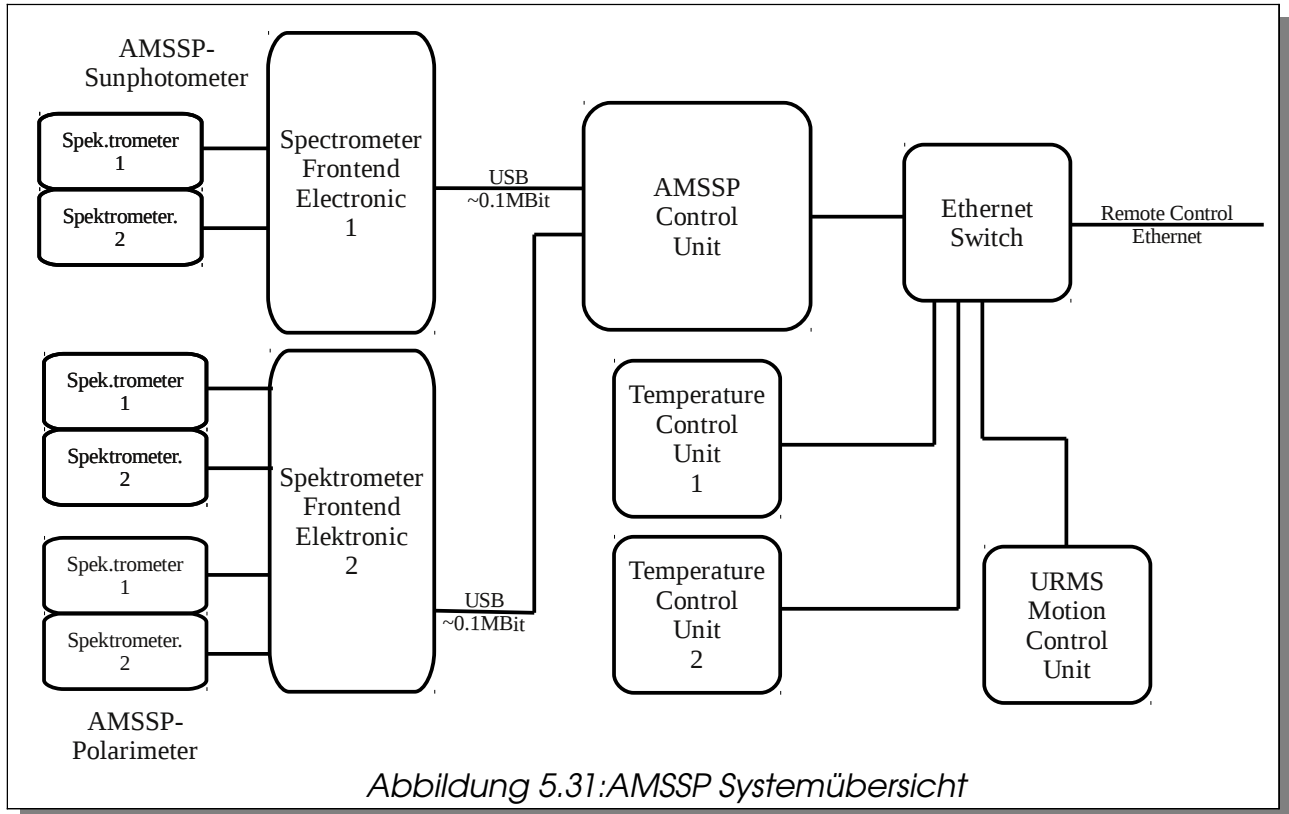


Abbildung 5.30: AMSSP-EM

Das optische Design des Polarimeters von AMSSP wurde im Rahmen einer Diplomarbeit von Andre Hollstein erarbeitet (Hollstein 2008). Es besteht im wesentlichen aus 4 Einkoppeloptiken die jeweils einen Polarisationsfilter und eine achromatische Wellenplatte beinhalten. Diese optischen Komponenten sind in einem Tubus mit Blenden zur Streulichtunterdrückung untergebracht. Damit ist es

möglich, den linearen und den zirkularen Anteil des eintretenden Lichtes zu messen. D.h. hiermit können alle vier Komponenten des Stokes-Vektors bestimmt werden. Die nächste Abbildung (5.31) zeigt die Systemübersicht von AMSSP und der Verbindung zu URMS bzw. URMS-MCU (*Motion Control Unit*).



6. Erste Messungen mit AMSSP-EM

In diesem Kapitel werden erste Messungen mit dem Entwicklungsmodell, AMSSP-EM vorgestellt. In der ersten Ausbaustufe wurde das Instrument in Nadir Blickrichtung zur Messung der nach oben gerichteten Strahlung vom Flugzeug aus eingesetzt. Dieses System wurde 2008 auf drei verschiedenen Kampagnen mit ähnlichen wissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt. Hauptziele waren die Polarisations-abhängigen Reflektionen einer Stratocumulus Wolkendecke zu messen. Dazu wurde das Instrument AMSSP-EM in *Nadir*-Blickrichtung in den jeweiligen Messträgern eingebaut. Die Flugbewegungen und Positionen wurden mit Lagereferenz-Systemen erfasst und können für die weiteren Auswertungen berücksichtigt werden. Die Messträger waren die Dornier 228 von Nerc (*Natural Environmental Research Council*) und die institutseigene Cessna 207T. Im Folgenden werden Messungen aus den zwei internationalen Kampagnen dargestellt. Das folgende Bild (Abbildung 6.32) zeigt den Einbau in die Dornier 228 während der Vocals Kampagne in Chile.

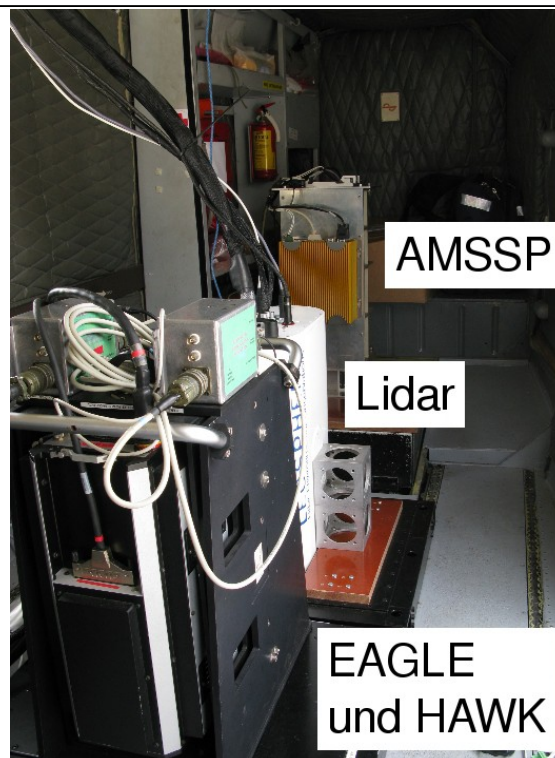
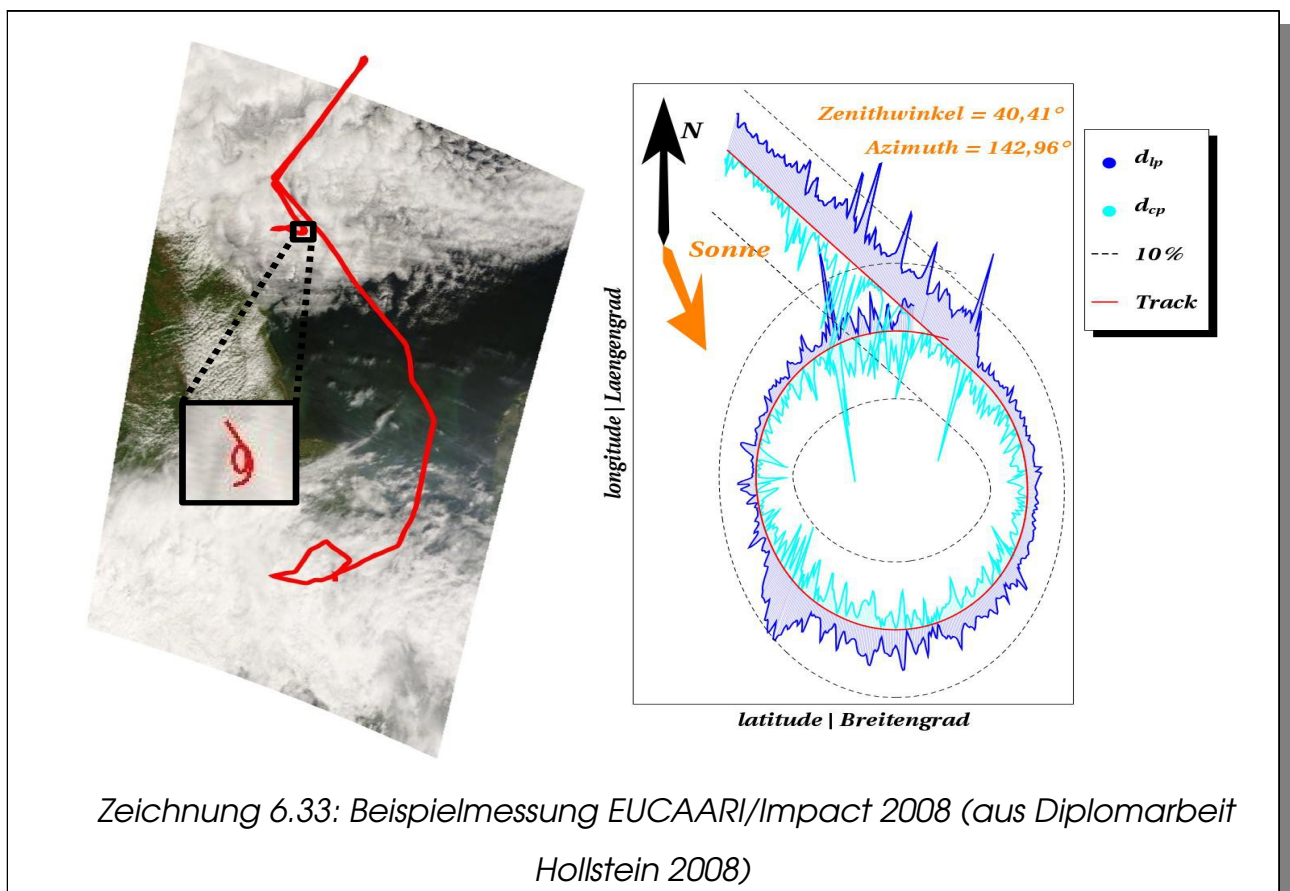


Abbildung 6.32: AMSSP-EM während der Vocals Messkampagne in Chile 2009

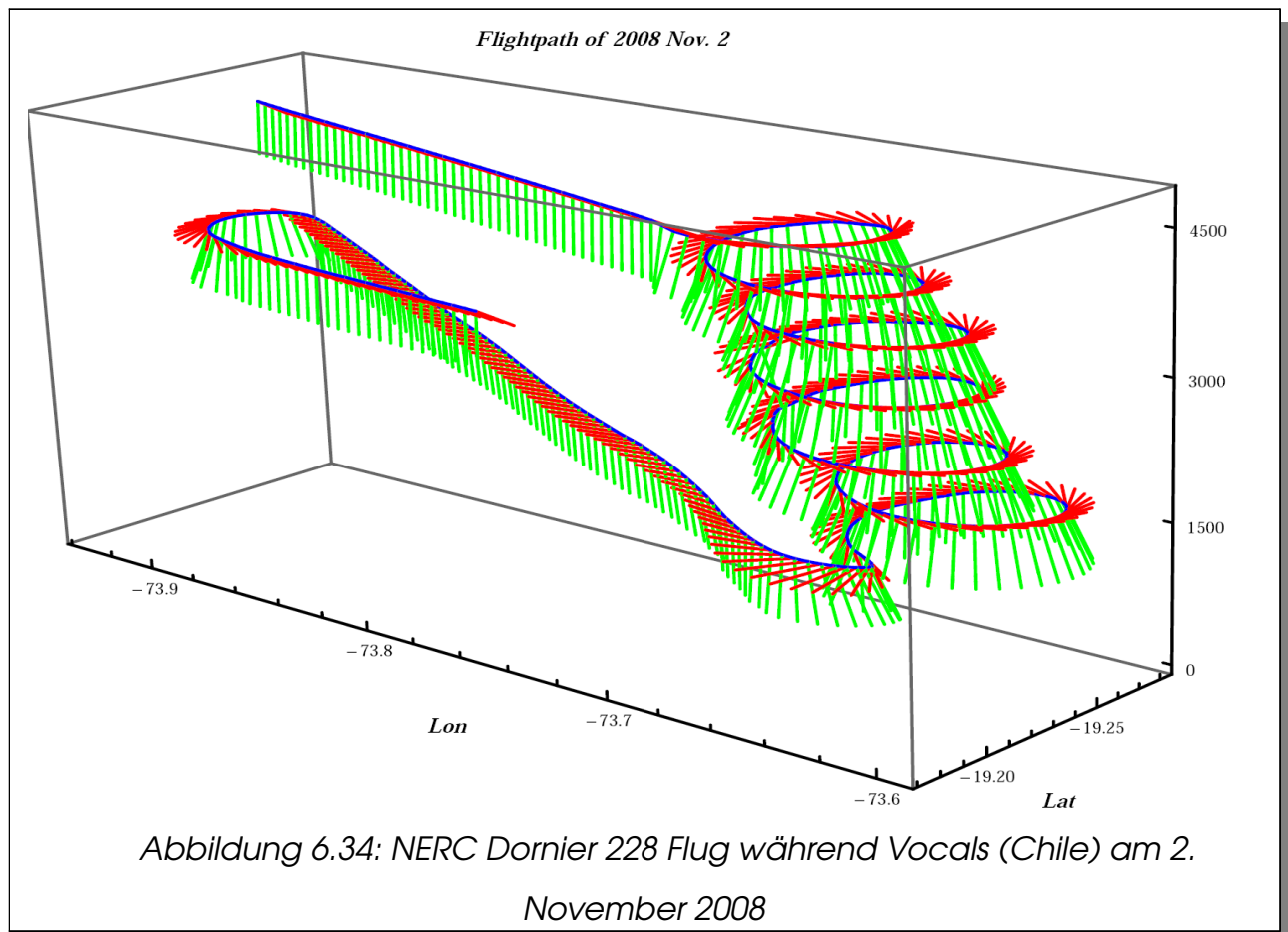
Das System wurde zusammen mit dem abgebildeten Spektrometer-System (Eagle/Hawk) und einem Lidar (Leosphere) eingesetzt. Die Messung aus Abbildung 6.33 zeigt eine Simulation für eine *multi-directional* Messung. Das Flugzeug flog in diesem Beispiel einen 2 Minutenkreis oberhalb einer geschlossenen Wolkendecke. Das Flugzeug hatte einen konstanten *Bank-angle* und so konnten verschiedene Reflektionswinkel zwischen Sonne, Wolke und Flugzeug simuliert werden.



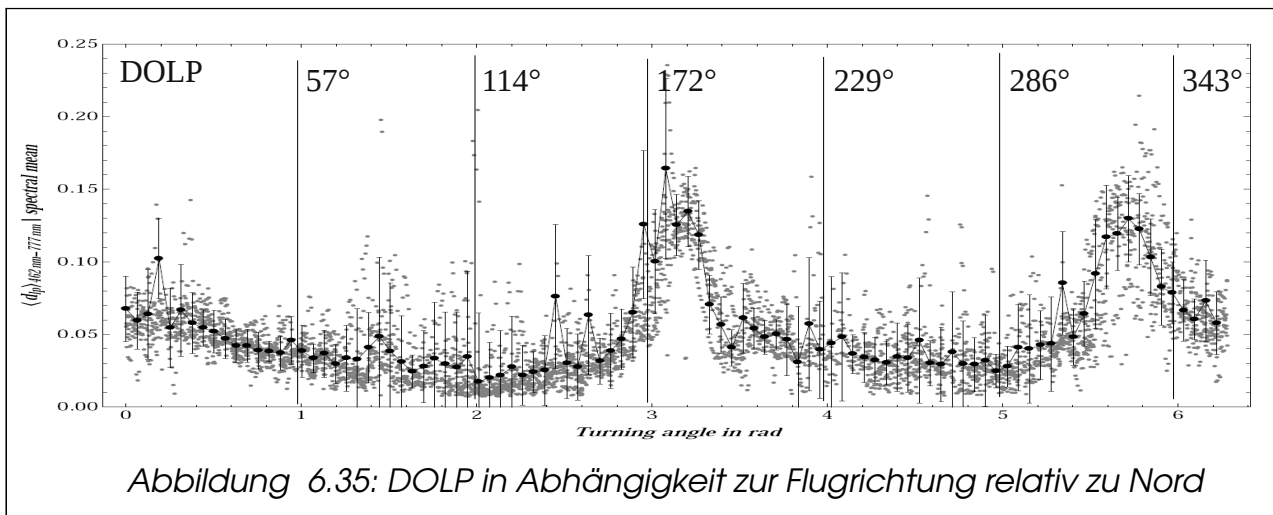
Auf der rechten Seite der Abbildung 6.33 sieht man in dunkelblau den linearen und in hellblau den zirkularen Polarisationsgrad. Beide schwanken mit der Flugzeug-Vorwärtsbewegung. Der zirkuläre Polarisationsgrad zeigte für diesen Flug über der Nordsee unerwartet hohe Werte von 1 - 10 %.

Diese Art der *multi-directional* Flugsimulation wurde während der

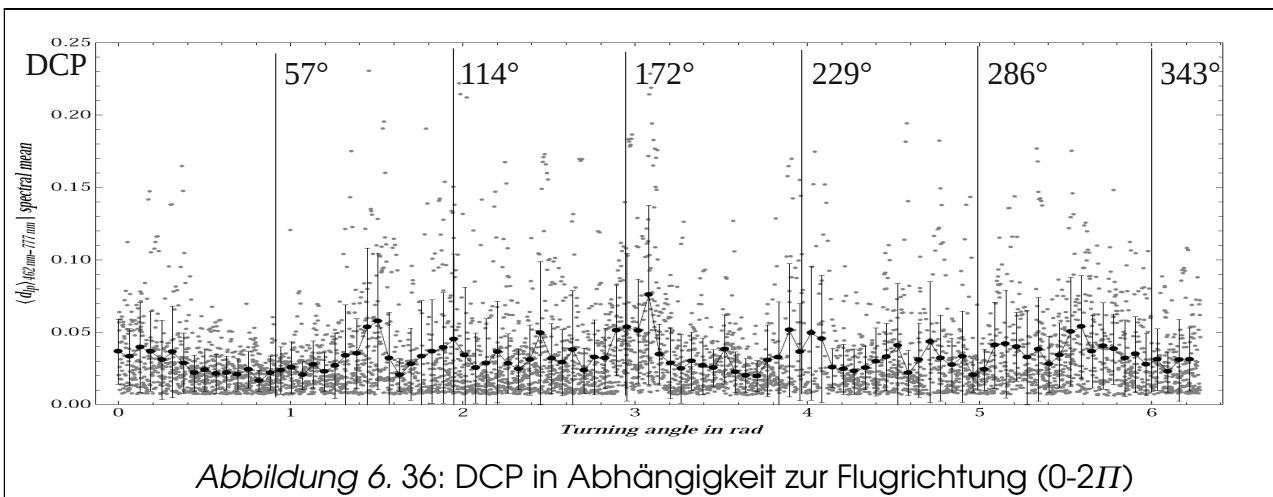
Messkampagne Vocals in Chile mit mehreren 2-Minuten Kreisen (Abbildung 6.34) wiederholt. Damit sollte statistisch die Auswertemöglichkeit erhöht werden. Der Flug wurde über einer homogenen optisch dicken *Strato-Cumulus* Wolkendecke durchgeführt. Der *Bank-angle* wurde wie vorher weitgehend konstant gehalten und mit einem kontinuierlichen Sinkflug verbunden.



Abbildungen 6.35 und 6.36 zeigen für alle Kreise die linearen und zirkularen spektral gemittelten Polarisationsgrade in Abhängigkeit zur Flugrichtung.



Der lineare Polarisationsgrad zeigt zwei Erhöhungen im Bereich der Regenbogen-Reflexionswinkel von Sonne und Wolkentröpfchen für einen Sonnenazimuth von 270° und einer Sonnenelevation von 60° für den Zeitpunkt des Kreisfluges. Trotz der Änderung der Höhe für die einzelnen Kreise bleiben die Winkel der Reflektionen und der Polarisationsgrad weitgehend konstant. Der lineare Polarisationsgrad lag im Maximum bei etwa 15 %.



Der zirkulare Polarisationsgrad hat für diesen Fall, in dem Bereich der Regenbogenreflexion nur leicht erhöhte Werte. Diese lassen aber keinen eindeutigen Schluss über eine eindeutige Erhöhung des zirkularen Anteils und einer

weiteren Auswertung zu. Der durchschnittliche zirkulare Anteil liegt bei 2 - 5 %. Der lineare Anteil von 10 – 15 % lässt eine weitere Auswertung der Messungen zu und eine Reihe von Autoren beschreiben Auswertungen (Breon and Goloub 1998, Kokhanovsky 2000, Riedi et al. 2007), die die Ableitung von Wolken-physikalischen Parametern mit Hilfe der Polarisation ermöglichen. Die weitere Auswertung der Messungen ist nicht Teil dieser Arbeit.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung von boden- und flugzeuggestützten Instrumenten zur Messung der in der Atmosphäre gestreuten Sonnenstrahlung beschrieben. Die hier gezeigten Messgeräte und Instrumente spiegeln die Entwicklung in diesem Gebiet in den letzten 10 Jahren wieder. Mit dem System URMS / AMSSP (*Universal Radiation Measurement System / Airborne Multi-Spectral Sunphoto- and Polarimeter*) wurde eine Plattform entwickelt, die über den aktuellen Stand der Technik im Bereich der flugzeuggestützten optischen Fernerkundung hinausgeht und dadurch derzeit weltweit einzigartige Messmöglichkeiten bieten wird. Insbesondere URMS ist durch die Möglichkeit des Austauschs des optischen Instrumentes auch zukünftig an den aktuellen Stand anpassbar. AMSSP ist das zur Zeit einzige flugzeuggestützte Instrument zur Messung des zirkularen Anteils der gestreuten Sonnenstrahlung. Die gezeigten Beispiele der ersten Messkampagnen und Messungen zeigen Phänomene, die so noch nicht veröffentlicht wurden und mit gängigen Strahlungstransportmodellen nicht modelliert werden können. Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet und weitere Entwicklungen und Optimierungen am System werden folgen. Das System wird voraussichtlich 2010 fertiggestellt werden und danach in die Flugerprobung gehen. Erste Missionen sind ab 2011 im Rahmen erster Demonstrationsmissionen mit HALO geplant.

8. Anhang

8.1. Kurzfassung der Historie

Zeitraum	Entdeckungen und Veröffentlichungen	Personen
ca. 800	Wikinger benutzen vermutlich Sonnenstein zur Navigation	Wikinger
1669	Beschreibung der optischen Eigenschaften des isländischen Kalkspatkristalls	Bartolinus
1689	Entdeckung der Doppelbrechung des isländischen Kalkspatkristalls und Beschreibung der welleneigenschaften des Lichtes	Christiaan Huygens
1704	Beschreibung des Lichtes als Teilchen und Welle	Sir Isaac Newton
1717	Erste Ideen zur Erklärung des Doppelbrechungsproblem	Sir Isaac Newton
1801	Entdeckung der Interferenz	Thomas Young
1802	Bestätigung der Experimente von Huygens	William Hyde Wollaston
1809	Himmelslicht ist polarisiert und es gibt einen neutralen Punkt in Abhängigkeit zum Sonnenstand	Dominique Francois Jean Arago
1810	Polarisation an der Wasseroberfläche	E. L. Malus
1815	Polarisation an spiegelnden Oberflächen	David Brewster
1817	Welleneigenschaften des Lichtes	Thomas Young
1819	Beschreibung unpolarisiertes und polarisiertes Licht	Jean-Augustin Fresnel
1828	Mathematische Beschreibung zu	George Green

Zeitraum	Entdeckungen und Veröffentlichungen	Personen
	den Theorien von Elektrizität und Magnetismus	
1840	Entdeckung eines weiteren neutralen Punktes	Jacques Babinet
1842	Entdeckung eines weiteren neutralen Punktes	David Brewster
1844	Polarisationsempfindlichkeit des menschlichen Auges	Karl von Haidinger
1845	Drehung der Polarisationsenebene in einem transparenten isotropischen Medium	Michael Faraday
1852	Mathematische Grundlagen zur Beschreibung von polarisiertem Licht	George Gabriel Stokes
1861	Verbindung der Welleneigenschaften des Lichtes mit dem Magnetismus (Maxwellsche Gleichungen)	James Clerk Maxwell
1862	Beeinflussung der Polarisationsenebene durch ein magnetisches Feld	Michael Faraday
1871	Beschreibung der Streuung und der Polarisation des Lichtes in der Atmosphäre (Rayleigh Streuung)	John William Strutt (Lord Rayleigh)
1896	Linienverbreiterung durch Polarisations-effekte in den Linienrändern	Pieter Zeemann Hendrik Antoon Lorentz
1900	Formulierung des Plancksches Strahlungsgesetzes mit Hilfe des	Max Ludwig Planck

Zeitraum	Entdeckungen und Veröffentlichungen	Personen
	sog. Planckschen Wirkungsquantums	
1927	Nicht relativistische Erklärung des Zeemann Effektes mit Hilfe der Quantenmechanischen Elektronen Theorie	Wolfgang Ernst Pauli
1928	relativistische Erklärung des Zeemann Effektes mit Hilfe der Quantenmechanischen Elektronen Theorie	Paul Adrien Maurice Dirac
1929	Beschreibung der anisotropischen Absorption mit Hilfe der Stokes Parameters	Paul Soleillet
1941	Mathematische Beschreibung des polarisierten Lichtes mit Hilfe des sog. Jones-Vektors	Robert Clark Jones
1947	Beschreibung von Strahlungstransportgleichungen mit der Hilfe von Stokes Parametern	Subrahmanyan Chandrasekhar
1948	Transformation von Stokes Parametern mit Hilfe der Müller Matrizen	Hans Müller
1953	Bienen können mit Hilfe des polarisierten Himmelslichtes navigieren	Karl von Fritsch
1963	Beschreibung eines makroskopischen isotropischen	J. M. Stone

Zeitraum	Entdeckungen und Veröffentlichungen	Personen
	Mediums mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen	
1971	Journal: Multiple scattering of polarized light in planetary atmospheres	J. W. Hovenier et al.
1983	Forschungsbericht W83-020 Optische Polarimetrie von Wasseroberflächen mit abbildenden Polarimeter	T. Prosch
1985	Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln Aerosol-Fernsondierung mittels Messung des Stokes-Vektors gestreuter Salarstrahlung	D. Hennings
1987	Journal: The adding method for multiple scattering calculations of polarized light	J. F. De Haan et al.
1991	Unified classical theory of line formation in a magnetic field, in Solor polarimetry	J. O. Stenflo
1995	Diplomarbeit: Spektral aufgelöste Messungen des linearen Stokes-Vektors atmosphärischen Streulichtes im sichtbaren und nahem infraroten Spektralbereich	Rene Preusker

Zeitraum	Entdeckungen und Veröffentlichungen	Personen
1997	Dissertation: Zur Ableitbarkeit von Aerosol- eigenschaften aus Polarisationsmessungen	Ute Böttger
1997	Satellite retrieval of aerosol propeties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight	M. I. Mishchenko et al.
2000	Dissertation: The spectral distribution of polarized light emerging from the terrestrial atmosphere	Daphne Marie Stam
2000	Dissertation: Restition des propriétés optiques et microphysiques des aerosols a partir d'observations sol des luminances totale et polarisee dans le visible et le proche infrarouge	Thierry Elias
2008	Dissertation: Influence of aerosols on polarization of skylight in gaseous absorption bands	Eyk Bösche

8.2. Referenzen

Asseng 2002: Hagen Asseng, Dissertation: „Bestimmung von Aerosoleigenschaften aus boden- und flugzeuggestützten optischen Messungen“, Freie Universität Berlin, (2002)

Asseng et al. 2004: Asseng, H., T. Ruhtz, und J. Fischer, 2004: Sun and aureole spectrometer for airborne measurements to derive aerosol optical properties. *Appl. Opt.*, 43, 2146 -2155.

Bismarck 2009: Jonas von Bismarck, Diplom: „Entwicklung und Aufbau eines flugzeuggestützten, multispektralen Radiometers zur Fernerkundung atmosphärischer Aerosole, Freie Universität Berlin, (2009)

Bösche 2002: Eyk Bösche, Diplom: „Aufbau und Beschreibung eines Polarisations-Spektrometers für die Fernerkundung der Atmosphäre“, Freie Universität Berlin, (2002)

Bösche 2008: Eyk Bösche, Dissertation: „Influence of aerosols on polarization of skylight in gaseous absorption bands“, Freie Universität Berlin, (2002)

Böttger 1997: Ute Böttger, Dissertation: „Zur Ableitbarkeit von Aerosoleigenschaften aus Polarisationsmessungen“, Freie Universität Berlin, (1997)

Breon and Goloub 1998: F.M. Breon and P. Goloub , Cloud Droplet Effective Radius from Spaceborne Polarization Measurements. *Geophys. Res. Lett.* **25**, pp. 1879–1992, (1998)

Bretagnon and Francou 2006: P. Bretagnon, G. Francou, „Planetary theories in

rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions", *Astronomy and Astrophysics*. Nr. 202, 1988, S. 309–315, (2006)

Chandrasekhar 1960: S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer*, Dover Books, ISBN 0-468-60590-6, (1960)

Chowdhary et al. 2002: Jacek Chowdhary, Brain Cairns, Larry D. Travis, Case studies of aerosol retrievals over the ocean from multi angle, multi-spectral photopolarimetric remote sensing data, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 383-397, doi:10.1175/1520-0469(2002)059, (2002)

Coulson 1988: Kinsell L. Coulson, *Polarization and intensity of light in the atmosphere*, (1988)

Elias 2000: Thierry Elias, Dissertation: „Restitution des propriétés optiques et microphysiques des aérosols à partir d'observation sol des luminances totale et polarisée dans le visible et le proche infrarouge", University Lille, (2000)

Elias et al. 1999: Thierry Elias, Claude Devaux, Philippe Goloub, Maurice Herman, „Polarizing properties of the aerosols in the north-eastern tropical Atlantic Ocean, with emphasis on the ACE-2 period", (1999)

Fritsch 1967: Fritsch K. von, „The dance Language and Orientation of Bees", Harvard University Press, (1967)

Gehrels 1973: Gehrels Thomas, „Photopolarimetry of Planets and Stars", *Vistas in Astronomy*, Volumn 15, Pages 113-118, IN3-IN4, 119-129 (1973)

Hansen & Travis 1974: Hansen, J.E., and L.D. Travis, „Light scattering in planetary

atmospheres", *Space Sci. Rev.*, 16, 527-610, doi:10.1007/BF0016806, (1974)

Hegedüs et al. 2007: Ramón Hegedüs, Susanne Åkesson, Rüdiger Wehner and Gábor Horváth, 'Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies', *Proc. R. Soc. A* 2007 463, 1081-1095, (2007)

Heinemann 2000: Thomas Heinemann, Dissertation: „Satellitenfernerkundung von Aerosolparametern mit MOS und MERIS“, Freie Universität Berlin, (2000)

Hough et al. 2006: J. H. Hough, P. W. Lucas, J. A. Bailey, M. Tamura, E. Hirst, D. Harrison, and M. Bartholomew-Biggs, „PlanetPol: A Very High Sensitivity Polarimeter“, *Astronomical Society of the Pacific*, 118:1302–1318, DOI: 10.1086/507955, (2006)

Holben et al. 1998: Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I. and Smirnov A., „AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization“, *REMOTE SENS. ENVIRON.* 66:1-16 (1998)

Hollstein & Ruhtz 2009: Hollstein A., Ruhtz T., „Method for retrieving the polarization properties of a waveplate assembled in a multispectral, complete polarimeter“, *Opt Lett* 34:2599, (2009)

Hollstein et al. 2009: Hollstein A., Ruhtz T., Fischer J., Preusker R., "Optimization of system parameters for a complete multispectral polarimeter," *Appl. Opt.* 48, 4767-4773 (2009)

Hoover & Tyo 2007: Brian G. Hoover and J. Scott Tyo, "Polarization components

analysis for invariant discrimination," *Appl. Opt.* 46, 8364-8373 (2007)

Horváth & Varjú 2004: Gábor Horváth, Dezső Varjú, *Circularly polarized light in nature*, (2004)

Horváth et al. 2002: Horvarth G., Bernarth B., Suhai B., Barta A., Wehner R., „First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere“, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 19, Issue 10, pp.2085-2099, (2002)

IPCC 2007: Intergovernmental panel of climate change, *Synthesis Report*, (2007)

Jaenicke 1993: Jaenicke, R., *Tropospheric aerosols*, in Hobbs, P. V. (Hg.), *Aerosol-cloud-climate interactions*, S. 1–31, Academic Press, San Diego, California, (1993)

Kattawar et al. 1976: Kattawar, G. W., G. N. Plass, and S. J. Hitzfelder, „Multiple scattered radiation emerging from Rayleigh and continental haze layer. 1: Radiance, polarization and neutral points“, *Appl. Opt.*, 15, 632– 647, (1976)

Kemp et al. 1971: Kemp J C., Wolstencroft R.D., Swelund J. B., „Circular Polarization: Jupiter and Other Planets“, *Nature* 232, 165 – 168 (16 July 1971), doi: 10.1038/232165a0, (1971)

Kennedy & Hamilton 2005: Kennedy S., Hamilton J., „Integration of Inertial Measurements with GNSS-NovAtel SPAN Architecture“, *Symposium Gyro Technology*, Stuttgart, (2005)

Kokhanovsky 2003: Kokhanovsky A., „Polarisation Optics of Random Media“, Springer, ISBN 3-540-42635-3, (2003)

Kokhanovsky 2000: Kokhanovsky, „The determination of the effective radius of drops in water clouds from polarization measurements“, Phys. Chem. Earth(B), Vol. 25, No5-6, pp.471-474, (2000)

Levin and Cotton 2008: Lev Levin and William R. Cotton, „Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A Scientific Review“, Verlag Springer, Netherlands, DOI10.1007/978-1-4020-8690-8_3, (2008)

Li et al. 2009: Li Z., Zhao X., Kahn R., Mishchenko M., Remer L., Lee K.-H., Wang M., Laszlo I., Nakajima T., and Maring H., „Uncertainties in satellite remote sensing of aerosols and impact on monitoring its long-term trend: a review and perspective“, Ann. Geophys., 27, 2755–2770, (2009)

Mayer et al. 2004: B. Mayer, M. Schröder, R. Preusker, L. Schüller, „Remote sensing of water cloud droplet size distributions using the backscatter glory: a case study“, Atmos. Chem. Phys., 4, 1255–1263, (2004)

Mie 1908: Gustav Mie „Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen“, Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 25, 1908, No. 3, p 377-445

Mishchenko et al. 2006: Mishchenko I. M., Travis D. L., Lacis A. A., „Multiple Scattering of Light by Particles“, Cambridge, ISBN 978-0-521-83490-2, (2006)

Mishchenko et al. 2007: Mishchenko I. M., Cairns B., Kopp G., Schueller C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D., „Accurate Monitoring of Terrestrial Aerosols and Total Solar Irradiance, Introducing the Glory Mission“, Bams, American meteorological society, May 2007, 678 – 691, (2007)

Nakajima et al. 1996: T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y.J. Kaufman, B.N. Holben, "Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions", *App. Opt.*, 35, 15, 2672-2686 (1996)

Penndorf 1957: Penndorf R., „Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 microns and their application to atmospheric optics“, *J. Opt. Soc.*, 47(176), 176-182., (1957)

Preusker 1995: Rene Preusker, Spektral aufgelöste Messungen des linearen Stokesvektors atmosphärischen Streulichtes im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich, (1995)

Prosch et al. 1983: Prosch Theodor, Raschke Ehrhard, „Optische Polarimetrie von Wasseroberflächen mit einem abbildenden Polarimeter“, BMFT Forschungsbericht W83-020, (1983)

Riedi et al. 2007: Riedi J., B. Marchant, S. Platnick, B. Baum, F. Thieuleux, C. Oudard, F. Parol, J-M. Nicolas, and P. Dubuisson, „Cloud thermodynamic phase inferred from merged POLDER and MODIS data“, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7,4103-14137 (2007)

Ruhtz et al. 1999a: Ruhtz T., Fischer J., Asseng H., „FUBISS (Free University Berlins Integrated Spectrographic System): A New Remote Sensing Instrument“, In Proceedings of the fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol I-486, 21-24 June 1999, Ottawa, Canada, Published by ERIM International Inc. P.O Box 134008, Ann Arbor, MI 48113-4008, ISSN 1076-7924, (1999a)

Ruhtz et al. 1999b: Ruhtz T., Fischer J., „CALIBRATION OF FUBISS (Free University Berlins Integrated Spectrographic System)“, In Proceedings of the fourth

International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol II-1, 21-24 June 1999, Ottawa, Canada, Published by ERIM International Inc. P.O Box 134008, Ann Arbor, MI 48113-4008, ISSN 1076-7924, (1999b)

Ruhtz et al. 2001: Ruhtz T., Boesche E., Fischer J., „Development of a new sensor module for hyperspectral polarimetric measurements“, SPIE Proceeding 4481, Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing Proceedings, ISBN 0-8194-4195-3 41 papers; Pub. Dec (2001)

Ruhtz et al. 2002: Ruhtz T., Bösche E., Schröder M., Fischer J., „First results driven with a new sensor modul for hyperspectral polarimetric measurements“, SPIE Proceeding 4819, Polarization Measurement, Analysis, and Applications, Page 139-144, ISBN 0-8194-4587-8; Pub. Dec (2002);

Ruhtz et al. 2009: Ruhtz T., Preusker R., Hollstein A., Bismarck v. J., Starace M., Fischer J., „URMS/AMSSP (Universal Radiation Measurement System / Airborne Multi-Spectral Sunphoto- and Polarimeter“, SPIE Remote Sensing Conference, (2009)

Russell et al. 2003: Russell, P. B., J. M. Livingston, O. Dubovik, S. A. Ramirez, J. Wang, J. Redemann, B. Schmid, M. Box, and B. N. Holben (2004), Sunlight transmission through desert dust and marine aerosols: Diffuse light corrections to Sun photometry and pyr heliometry, *J. Geophys. Res.*, 109, D08207, doi:10.1029/2003JD004292. (2003)

SAD 1999: „National Ambient Air Quality Objectives For Particulate Matter“, Science assessment document CEPA/FPAC Working Group, CANADA, (1999)

Schröder et al. 2004: M. Schröder, R. Bennartz, J. Fischer, T. Ruhtz, „Airborne remote sensing of cloud radiative smoothing during the Batex Bridge Cloud campaign“, *Atmospheric Research*, 72, P. 107 – 127, Elsevier, (2004)

Schmid et al. 2003: B. Schmid, D.A. Hegg, J. Wang, D. Bates, J. Redemann, P.B. Russell, J.M. Livingston, H.H. Jonsson, E.J. Welton, J.H. Seinfeld, R.C. Flagan, D.S. Covert, O. Dubovik and A. Jefferson, Column closure studies of lower tropospheric and water vapor during ACE-Asia using airborne Sun photometer and airborne in situ and ship-based lidar measurements, (2003)

Schmid et al. 2006: B. Schmid, R. Ferrare, C. Flynn, R. Elleman, D. Covert, A. Strawa, E. Welton, D. Turner, H. Jonsson, J. Redemann, J. Eilers, K. Ricci, A. G. Hallar, M. Clayton, J. Michalsky, A. Smirnov, B. Holben, and J. Barnard, „How well do state-of-the-art techniques measuring the vertical profile of tropospheric aerosol extinction compare?“ ,Journal of Geophysical Research, VOL. 111, D05S07, doi:10.1029/2005JD005837, (2006)

Schueller et al. 1997: L. Schuller, J. Fischer, W. Armbruster, B. Bartsch, Calibration of high resolution remote sensing instruments in the visible and near infrared, Advances in Space Research, Volume 19, Issue 9, Calibration and Intercalibration of Satellite Sensors and Early Results of Radarsat, (1997)

Sekera 1967: Sekera Z., „Determination of Atmospheric Parameters from Measurement of Polarization of Upward Radiation by Satellite or Space Probe“, ICARUS 6, (1967)

Sparks et al. 2009: William B. Sparks,, James Hough, Thomas A. Germer, Feng Chen, Shiladitya DasSarma, Priya DasSarma, Frank T. Robb, Nadine Manset, Ludmilla Kolokolova, Neill Reid,, F. Duccio Macchetto, and William Martin, „Detection of circular polarization in light scattered from photosynthetic microbes“, PNAS, Page 7816–7821, Vol. 106, no. 19 www.pnas.org, doi: 10.1073, pnas.0810215106, (2009)

Stam 2000: Daphne M. Stam, PHD: „The spectral distribution of polarized light emerging from the terrestrial atmosphere“, (2000)

Stokes 1852: George Gabriel Stokes, „On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources“, (1852)

Tyo 2002: Tyo J. S., „Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error“, Appl. Opt. 41 619–30 (2002)

van der Hulst 1957: van de Hulst, H.C. , „Light Scattering by Small Particles“, New York, Wiley, (1957)

Veefkind 1999: Joris Pepijn Veefkind, PHD: „Aerosol Satellite Remot Sensing“, (1999)

Volten et al. 1998: H. Volten, J. F. de Haan, J. W. Hovenier, R. Schreurs, W.Vassen, A. G. Dekk, Laboratory measurements of angular distributions of light scattered by phytoplankton and slit, (1998)

Walraven 1981: R. Walraven, “Polarization imagery“, Optical Engineering, Vol. 20, Page 15–18, (1981)

Zieger 2007: Zieger P., Ruhtz T., Preusker R. and Fischer J., "Dual-aureole and sun spectrometer system for airborne measurements of aerosol optical properties", Appl. Opt. 46, 8542-8552 (2007)

Zieger 2006: Zieger P., Diplomarbeit, "Entwicklung eines flugzeuggestuetzten Spektrometersystems zur Fernerkundung von aerosoloptischen Eigenschaften", Freie Universität Berlin (2006)

8.3. Abkürzungsverzeichnis

AMSSP	Airborne Multispectral Sunphoto- and Polarimeter
ASA	Aureole Sunphotometer Adapter
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DSP	Digitaler Signalprozessor
EM	Engineering Model
FUBISS	Free University Berlin Integrated Spectrometric System
FOV	field of view
FWHM	Full width half minimum, Halbwertsbreite
GPS	Global Positioning System, Satellitengestütztes Navigationssystem zur zivilen und militärischen Nutzung
HALO	High Altitude Long Range research aircraft
IDL	Interactive Data Language
IPC	Industrial Personal Computer
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDU	Motor Driver Unit, Motorsteuereinheit
NERC	Natural Environmental Research Council
OIC	Optical Instrument Container
URMS	Universal Radiation Measurement System
TCU	Temperature Control Unit
SPP	Schwerpunktprogramm

9. Danksagung

Diese Dissertation, nach meiner eigentlichen Arbeit, in den Abendstunden zu schreiben, hat insbesondere meiner Familie viel abverlangt und Zeit gekostet. Ich danke meiner Familie und ganz besonders meiner Lebenspartnerin und meinen Kindern, die nie müde wurden zu fragen wann ich denn endlich fertig bin, warum ich schon wieder am Rechner sitze und warum ich ständig irgendwelche englischen Texte oder Bücher lese.

Besonders danken möchte ich Jürgen Fischer, der es wie kaum ein anderer versteht, seinen Mitarbeitern ihren Freiraum für kreatives und selbst bestimmtes Arbeiten zu geben, sie zu motivieren und trotzdem als Team zusammen zu halten und gemeinsame Ziele zu definieren.

Vielen Dank gilt meinem Kollegen Carsten Lindemann. Die vielen Flüge, Kampagnen und Reisen mit ihm sind viele unvergessene Erlebnisse. Man kann sich keinen besseren Kollegen wünschen, der durch seine Hilfsbereitschaft, Erfahrung und sein Wissen viele Messungen erst ermöglicht hat.

Kuddel möchte ich danken, dass er mir immer, wenn ich Hilfe bei der Mechanik brauchte, tatkräftig Unterstützung geleistet hat. Ohne ihn hätte ich so manches Gerät nicht bis zur Messkampagne fertig bekommen. Auch Andreas gilt mein Dank. Er ist immer wieder eingesprungen, wenn bei der Elektronik Man-Power gefehlt hat.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen am Institut und den vielen studentischen Hilfskräften, Diplomanden und Doktoranden. Hier findet man immer Diskussionspartner oder Hilfe bei den anstehenden Arbeiten. Hier ist René die Zentrale und mit seinem Büro in der Mitte des Institutes die erste Adresse. Besonders danken möchte ich alle diejenigen, die mit ihren Diplom- oder auch Doktorarbeiten an den Geräteentwicklungen und Messkampagnen beteiligt waren. Sie haben mit ihren Arbeiten viel zu der Gesamtentwicklung beigetragen.

10. Lebenslauf (CV)

Thomas Ruhtz

Freie Universität Berlin (FUB)

Institute for Space Sciences,
Faculty for Earth Sciences,

Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10
D-12165 Berlin, Germany

Mail: Thomas.Ruhtz@fu-berlin.de

Der Lebenslauf ist in der Online-Version
aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.
