

Zusammenfassung

Atmosphärische Schwerewellen (GWs) beeinflussen den Impuls- und Energiehaushalt der Mittelatmosphäre maßgeblich, doch ihre Spektren und Energetik sind aufgrund spärlicher, verrauschter Beobachtungen schwer zu quantifizieren. Zudem bleibt ihre Darstellung in Modellen durch die „Grauzone“ der Auflösung und heuristische Parametrisierungen begrenzt. Diese kumulative Dissertation treibt die Charakterisierung von GW-Spektren, Variabilität und Wellen-Mittelfluss-Wechselwirkungen im Bereich von 30–70 km voran, indem Doppler-Rayleigh-Mie-Raman (DRMR) Lidar-Messungen mit maßgeschneiderten Spektralschätzern kombiniert werden. Die Arbeit basiert primär auf einem einzigartigen Datensatz aus sieben Jahren (2017–2023) simultaner Temperatur- und Horizontalwindprofile des ALOMAR DRMR Lidars (69°N), ergänzt durch eine Fallstudie des Polar-Night-Jets (PNJ) in Kühlungsborn (54°N) und einen Modell-Daten-Vergleich während der VortEx-Kampagne.

Methodische Verzerrungen durch Datenlücken werden untersucht; dabei zeigt sich, dass interpolationsbasierte Fourier-Spektren die Steigung der Spektralkurven künstlich erhöhen können, indem sie hochfrequente Varianz unterdrücken. Im Gegensatz dazu liefern die Haar-Strukturfunktion und das (unsicherheitsgewichtete) verallgemeinerte Lomb–Scargle-Periodogramm weniger verzerrte Schätzungen, insbesondere bei vorliegender Heteroskedastizität des Rauschens. Diese validierten Methoden bieten die notwendige Präzision, um physikalische Spektralmerkmale von Beobachtungsartefakten zu trennen und ermöglichen so eine zuverlässige Quantifizierung der Wellenenergie in Stratosphäre und Mesosphäre.

Die Anwendung dieser Werkzeuge ermöglichte die erste mehrjährige Untersuchung von kinetischen und potenziellen Energiespektren in der polaren Mittelatmosphäre mit deutlichem jahreszeitlichem Kontrast: Der Winter weist eine breitbandige Variabilität aufgrund verstärkter Anregung auf, was zu konsistenten Spektralsteigungen über die Höhe führt. Die Sommerspektren hingegen zeigen ein „Broken-Power-Law-Verhalten“, das mit zunehmender Höhe in ein einfaches Potenzgesetz übergeht, sowie eine ausgeprägte Population von Trägheitsschwerewellen, deren Verhältnis von kinetischer zu potenzieller Energie zu kurzen vertikalen Wellenlängen hin signifikant ansteigt (bis zu ~ 20 nahe $\lambda_z = 1$ km).

Rotationsspektren von Fallstudien aus diesem Datensatz liefern weitere Belege dafür, dass die Sommersvariabilität eher durch kohärente, aufwärts propagierende Trägheitsschwerewellen als durch linear polarisierte Wellen oder Turbulenz dominiert wird. Zudem reproduziert ein Vergleich mit einer GW-auflösenden UA-ICON-Simulation während der VortEx-Kampagne die beobachteten Niveaus der potenziellen Energie, offenbart jedoch ein Defizit an niederfrequenter kinetischer Energie aufgrund der begrenzten vertikalen Auflösung für Moden mit $\lambda_z \approx 1$ –3 km.

Abschließend zeigt die PNJ-Fallstudie, dass der Jet quasi-monochromatische GWs sowohl filtert als auch lokal erzeugen kann: Eine hodographbasierte Analyse identifiziert 167 kohärente Wellenpakete, rekonstruiert den Großteil der beobachteten

Störungen (z. B. $\sim 83\%$ der Temperaturvarianz) und deutet darauf hin, dass intermittente Scherung am Jet-Rand Pakete mit kurzem λ_z anregen und brechen kann (einschließlich häufiger Abwärtspropagation, $\sim 35\%$), die im Kern des PNJ (40–55 km) stark unterdrückt werden. Zusammen mit den mehrjährigen Spektralergebnissen impliziert dies, dass die Variabilität und der Impulstransport der polaren Mittellatmosphäre durch Prozesse geprägt werden, die in grob aufgelösten Modellen unterrepräsentiert sind, dass das GW-Energiebudget systematisch kinetischer ist, als rein temperaturbasierte Metriken vermuten lassen, und dass Doppler-Lidar-Aufzeichnungen eine robuste GW-Charakterisierung sowohl durch mittlere Spektren als auch durch Analysen einzelner Wellenpakete ermöglichen.