

Vergleich zwischen einem klassischen Beobachter und einem Unscented Kalman-Filter für die Extraktion von Control-Equivalent Turbulence Inputs aus Flugversuchsdaten

Rafael Dux¹, Tobias Ehlert^{*2}

¹TU Delft, Fakultät für Luft- und Raumfahrt, Kluyverweg 1, 2629HS, Delft, Niederlande

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flugsystemtechnik, Lilienthalplatz 7, 38108, Braunschweig, Deutschland

*tobias.ehlert@dlr.de

Hintergrund

- Hubschrauber agieren häufig in anspruchsvollen Umgebungen die von Turbulenzen gekennzeichnet sind.
- Robuste Regelung benötigt ein Modell dieser Turbulenz.
- Traditionelle Flugzeug-Turbulenzmodelle sind für Hubschrauber im Schwebeflug nicht geeignet und numerische Turbulenzmodelle sind rechenintensiv.

CETI Turbulenzmodellierung

- Aus Flugversuchsdaten in Turbulenz wird eine Zeitreihe von äquivalenten Regelgrößen (CETI) ermittelt, welche, in ruhiger Luft, den Teil des Verhaltens des Hubschraubers reproduzieren würden, der der Turbulenz zuzuordnen ist.
- Ein CETI Turbulenzmodell ist ein von weißem Rauschen gespeister Filter, der im Frequenzverhalten den CETI-Werten entspricht.

Flugversuch & Flugmechanisches Modell

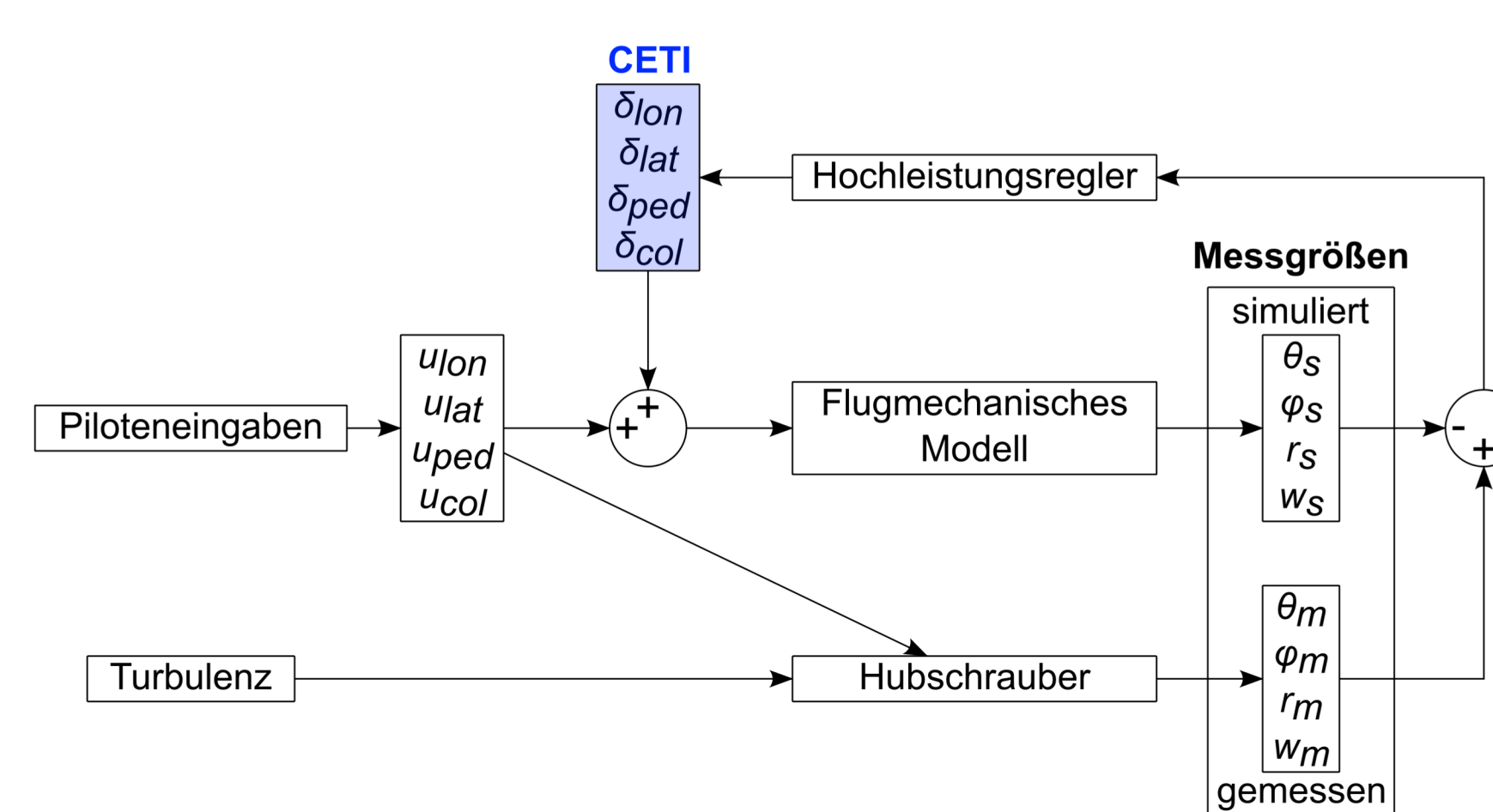
- Der Flugversuch war ein Schwebeflug in turbulenter Atmosphäre, mit minimalen stabilisierenden Eingriffen des Piloten.
- Der unbemannte Forschungshubschrauber midiARTIS flog 8 Messreihen für insgesamt 23 Minuten.
- Das lineare flugmechanische Modell mit 11 Freiheitsgraden wurde im Schwebeflug in ruhiger Luft identifiziert.



Unbemannter Forschungshubschrauber midiARTIS.

CETI-Extraktion mit einem klassischen Beobachter

- Der klassische Beobachter basiert auf einem Hochleistungsregler der speziell zur Flugregelung des midiARTIS entworfen wurde.
- Der Regler besteht aus Vorsteuerung und PID-Rückführung für die Nick- und Rollwinkel θ & φ , die Gierrate r und die Vertikalgeschwindigkeit w .



CETI Extraktion mit einem klassischen Beobachter.

CETI-Extraktion mit einem Unscented Kalman-Filter

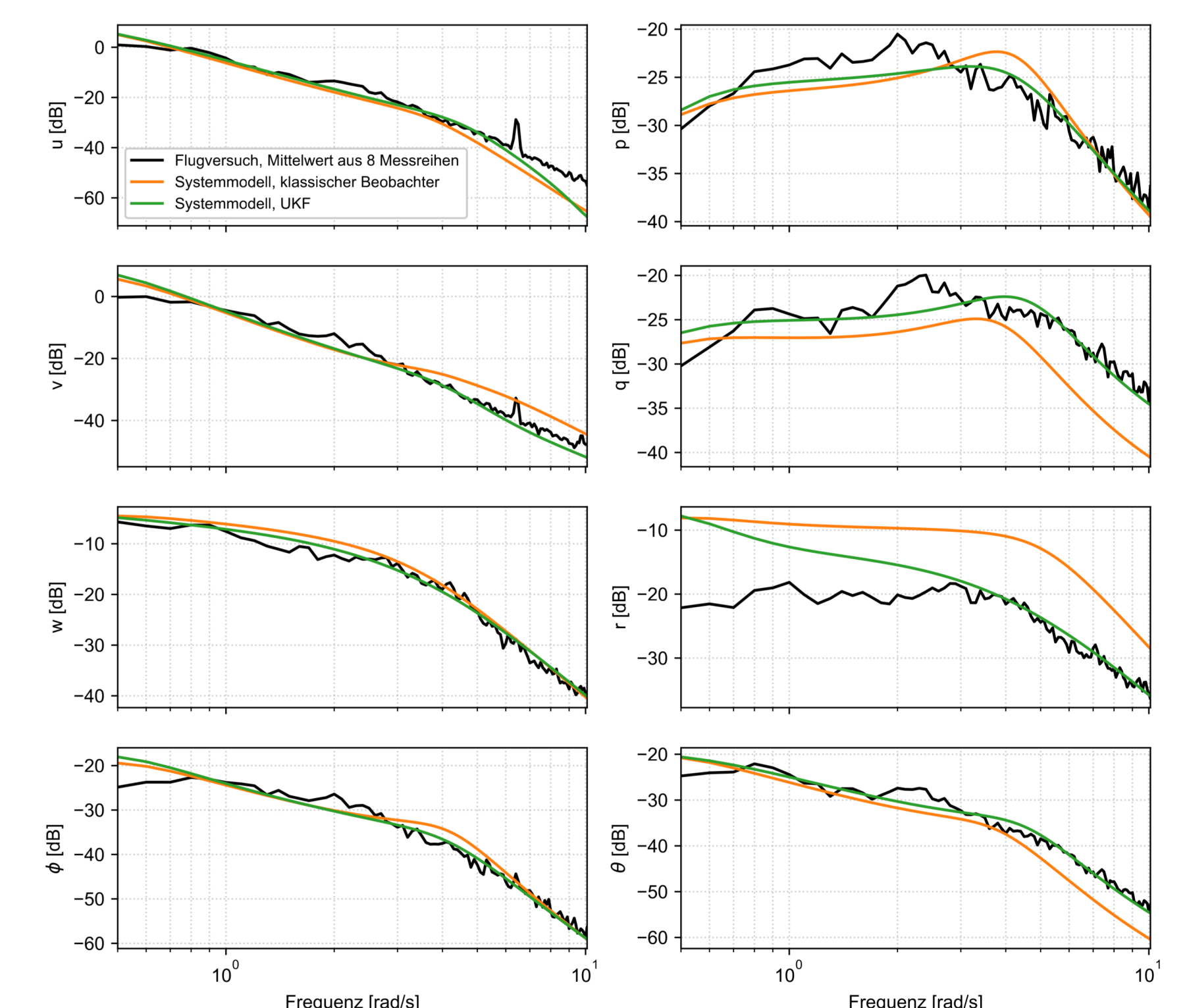
- Der Unscented Kalman-Filter schätzt den Systemzustand, daher wird der Zustandsvektor des flugmechanischen Modells um die CETI-Größen erweitert.
- Das flugmechanische Modell wird als ideal angesehen, alle Abweichungen zu den Messdaten werden den CETI-Größen zugeordnet.
- Die Kovarianzmatrix des Messrauschen wird manuell optimiert.

Turbulenzmodellierung & Kombiniertes Systemmodell

- Das Autoleistungsspektrum der CETI-Zeitreihen wird berechnet und über die Messreihen gemittelt, jeweils separat für die CETI-Werte des klassischen Beobachters und jene des UKF.
- Die Turbulenzfilter werden identifiziert als Übertragungsfunktionen 2. Ordnung basierend auf den gemittelten CETI-Spektren.
- Die Turbulenzfilter können mit dem flugmechanischen Modell zu einem Systemmodell kombiniert werden.
- Die stabile Vertikal-Dynamik wird mit dem Kollektiv-Turbulenzfilter zu einem vertikalen Submodell kombiniert.

Validierung mittels des Frequenzgangs

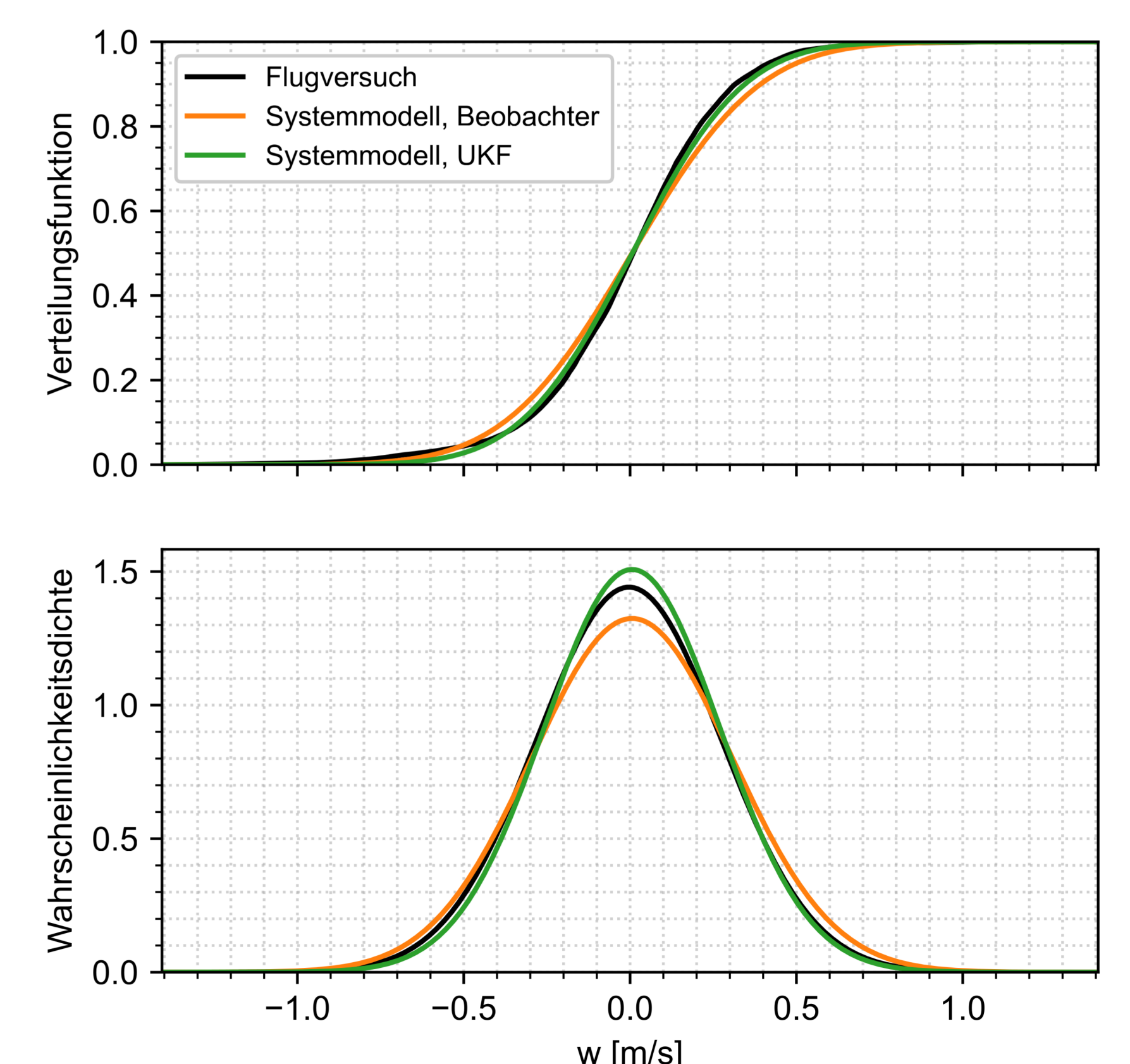
- Der Frequenzgang des kombinierten Systemmodells kann für ein lineares Modell analytisch berechnet werden und mit den Messdaten verglichen werden.
- Das UKF Systemmodell hat eine höhere Übereinstimmung mit den Flugversuchsdaten für alle 8 Messgrößen.



Vergleich zwischen den Spektren der Systemmodelle des klassischen Beobachters und des UKF und den gemittelten Spektren der Messdaten.

Stationäre Verteilung der Vertikalgeschwindigkeit

- Die stationäre Verteilung des vertikalen Submodell ist eine Normalverteilung.
- Beide Systemmodelle ähneln der Verteilung der Messdaten, wobei der UKF eine geringere Abweichung als der klassischen Beobachter aufweist.



Verteilung der Vertikalgeschwindigkeit w , Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte. Vergleich zwischen den Messdaten und den vertikalen Submodellen des klassischen Beobachters und des UKF.