

# Turbinen-Tuning am virtuellen Flugzeug

- **Echtzeitsimulation eines komplexen Flugzeugmodells**
- **HIL-Simulation mit Turbinen-Emulator im Regelkreis**
- **Optimierung des Turbinen-reglermodells**

Das Air Force Research Laboratory (AFRL) nutzt die Vorteile der Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulation mit dSPACE Simulator für die Entwicklung und Optimierung der Antriebssysteme kommender Flugzeuggenerationen. Durch die Echtzeitsimulation von Turbinen- und Flugzeugmodellen in Kombination mit realen Turbinen-Hardware-Komponenten eröffnen sich neue Möglichkeiten, Regler für Turbinen auszulegen. Optimierte Algorithmen erlauben Flugzeugen nicht nur höher und schneller zu fliegen, sondern auch weniger Treibstoff zu verbrauchen und weniger Wärme in den zirkulierenden Treibstoff abzuführen.

Mit steigender Anzahl der elektrischen Subsysteme werden auch die Leistungsanforderungen an Flugzeuge immer höher. Die Subsysteme haben direkten Einfluss auf die Antriebssysteme und sind somit in Systemanalysen nicht länger vernachlässigbar. Zudem muss die Leistung des gesamten Flugzeugs bei der Wechselwirkung zwischen den elektrischen Versorgungs- und Antriebssystemen berücksichtigt werden. Die höheren Lastanforderungen an diese Systeme führen dazu, dass Schub, Geschwindigkeit und Flughöhe schwanken können. Daraus ergeben sich unterschiedliche Betriebsparameter für den Antrieb.

bei der Ausführungszeit offen gelegt. Durch das Hinzufügen realer Hardware-Komponenten ist zudem eine vollständigere Analyse der Wechselwirkungen zwischen Antriebslast und Flugzeugleistung möglich. Um die Auswirkungen auf Systemebene auszumachen, arbeitet das Air Force Research Laboratory (AFRL) mit integrierten Systemanalysen unter Einsatz modernster Modellierungs- und HIL-Simulationstechniken. „Antriebs-, Leistungs- und Thermosubsysteme dieses Flugzeugtyps müssen getestet und analysiert werden, um Abhängigkeiten und jede nur mögliche Konsequenz zu ermitteln“, so AFRL Senior Electrical Engineer und Physiker Peter Lamm. „Durch moderne Echtzeitsimulation mit Prototypen der Turbinen-Hardware-Komponenten können wir die Abhängigkeiten identifizieren und negative Auswirkungen schon vor dem kostenintensiven Hardware-Prototyping ausmachen.“

## Mit HIL zu integrierten Systemanalysen

Der Einsatz der Hardware-in-the-Loop (HIL)-Analyse mit einem integrierten echtzeitfähigen Flugzeug/Antriebssystem hat bereits enormes Potenzial u. a.



▲ Zukünftige Flugzeuggenerationen profitieren von den optimierten Turbinenmotorsteuerungen, entwickelt mit dSPACE Simulator.

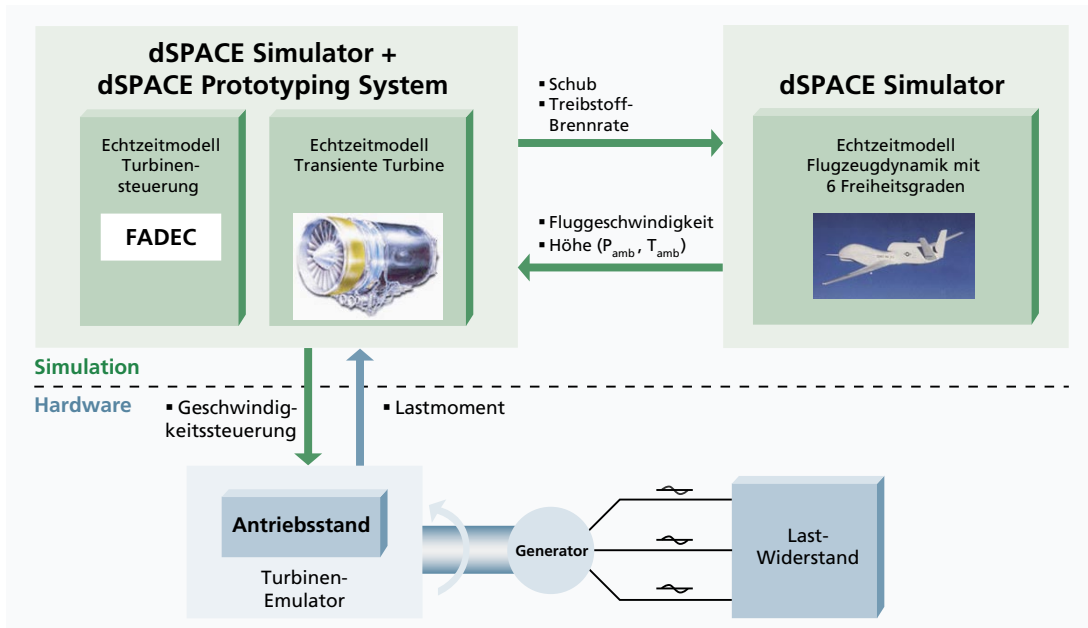
Wir die Abhängigkeiten identifizieren und negative Auswirkungen schon vor dem kostenintensiven Hardware-Prototyping ausmachen.“

## Virtuelle Darstellung des Flugzeugs

Das AFRL hat eine echtzeitfähige HIL-Simulationstesteinrichtung aufgebaut – die virtuelle Darstellung des Turbinenmotor- und Versorgungssystems für Flugzeuge –, um die Wechselwirkung zwischen Antriebs-, Versorgungs- und Thermosubsystemen zu untersuchen.

Um Parameter wie Umgebungsdruck, -temperatur und Flugeschwindigkeit berücksichtigen zu können, wird zudem ein Flugzeug in Echtzeit simuliert. Der Prüfstand hat vier Hauptkomponenten:

vier Hauptkomponenten:



▲ Zwei dSPACE Simulatoren und ein Prototyping-System führen das Reglermodell und das Flugzeugsystemmodell in Echtzeit aus.

- Turbinenmotordynamik- und Flugzeugsimulatoren, bestehend aus einem dSPACE-Prototyping-System und einem dSPACE Simulator (HIL)
- Generisches Turbinenmotormodell, Flugzeugmodell und FADEC (Full Authority Digital Engine Control), entwickelt in einer MATLAB®/Simulink®-Umgebung
- Aircraft Engine Spool Emulator, bestehend aus einem Antriebsstand, Drehzahlregelung und Drehmoment-Feedback
- Elektrisches Versorgungssystem, bestehend aus Flugzeugtestgenerator und Last

linearen Transienten. Die Simulationen lieferten andere Ergebnisse als Versuchsreihen mit konstanter Höhe und Fluggeschwindigkeit. Weil das Einschwingverhalten die Verdichterpöderung der Turbine stören kann, ist es von entscheidender Bedeutung, die Transienten mit der

*„Die Ergebnisse mit dem dSPACE Simulator bestätigen das Potenzial der HIL-Simulationen in der Luft- und Raumfahrt und eröffnen neue Möglichkeiten, verschiedene Antriebskonfigurationen mit minimalem Kostenaufwand umfassend zu untersuchen.“*  
**Peter Lamm, Air Force Research Laboratory**

## Kombination aus Reglermodell und Regelstrecke in Echtzeit

Drei Systeme bilden die dSPACE-Simulationsumgebung: der generische Turbinenmotor, das Flugzeug und die eigenständigen, echtzeitfähigen FADEC-Modelle. Letztere werden auf einem dSPACE-Prototyping-System ausgeführt; das Turbinenmodell und das Flugzeugmodell (vollständiges Flugzeugdynamikmodell mit 6 Freiheitsgraden einschließlich 3D-Rotation und -Translation) laufen auf zwei dSPACE-HIL-Simulatoren.

## Variantsimulationen

Mit diesem System wurden die Flugzeug-, Antriebs- und Versorgungssystemmodelle untersucht und zahlreiche Experimente mit dem Niederdruckgenerator als Hardware-Komponente im geschlossenen Regelkreis durchgeführt. Dabei kam es bei Lastwechseln zu beträchtlichen nicht

Flugzeugdynamik zu modellieren und zu analysieren. Lamm dazu: „Die Ergebnisse mit dem dSPACE Simulator bestätigen die Nützlichkeit der HIL-Simulationen in der Luft- und Raumfahrt und eröffnen neue Möglichkeiten, verschiedene Antriebskonfigurationen mit minimalem Kostenaufwand umfassend zu untersuchen.“

## HIL-Simulationen zur Leistungssteigerung

Lamm ist überzeugt, dass sich durch die HIL-Simulationen neue Möglichkeiten für Turbinenmotorsteuerungen und zur Leistungssteigerung der Turbinenmotoren bieten, wodurch Flugzeuge nicht nur höher und schneller fliegen können, sondern auch weniger Treibstoff verbrauchen und weniger Wärme in den zirkulierenden Treibstoff abführen.

Quelle:  
 Transient Analysis of an Aircraft/Propulsion System with Hardware-in-the-Loop Power Extraction, Kyle L. Miller, J. Mitch Wolff, Eric A. Walters, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2007, OH, USA