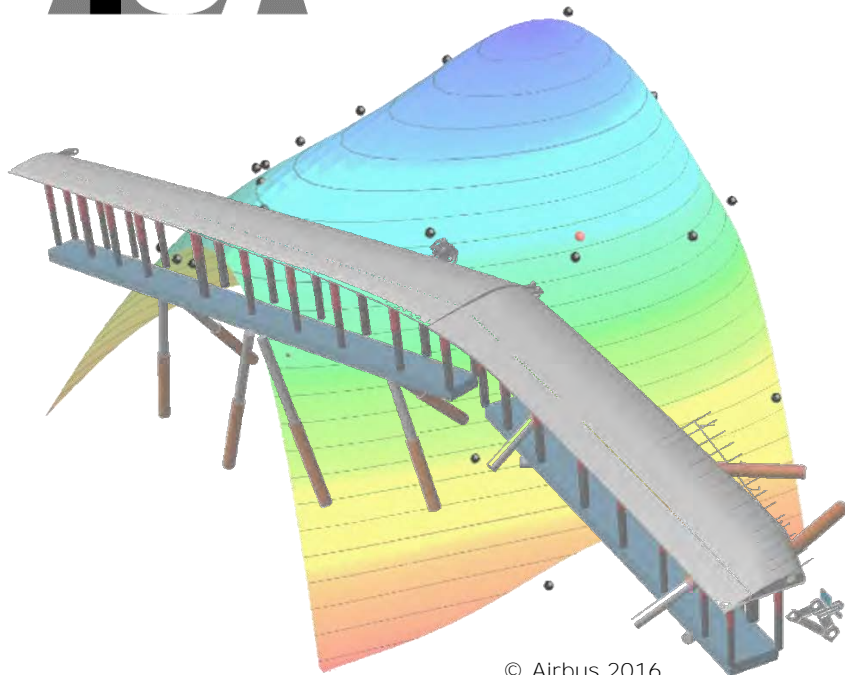


# Virtuelle Experimente mit Datenbasierten Modellen



© Airbus 2016

VDI Wissensforum

Veit Bayer  
Dynardo GmbH, Weimar

Jürgen Horwege  
Airbus GmbH, Bremen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Übersicht

## Einführung

- Highlift – System eines Flugzeugs
- Testverfahren: physikalisch, virtuell
- Datenbasierte Modelle: Physikalisch vs. mathematisch

## Projekt ViSA: datenbasierte Modelle für dynamische Systeme

- Field-Metamodel of Optimal Prognosis
- Zeitinvariantes Modell
- Zeitvariantes Modell

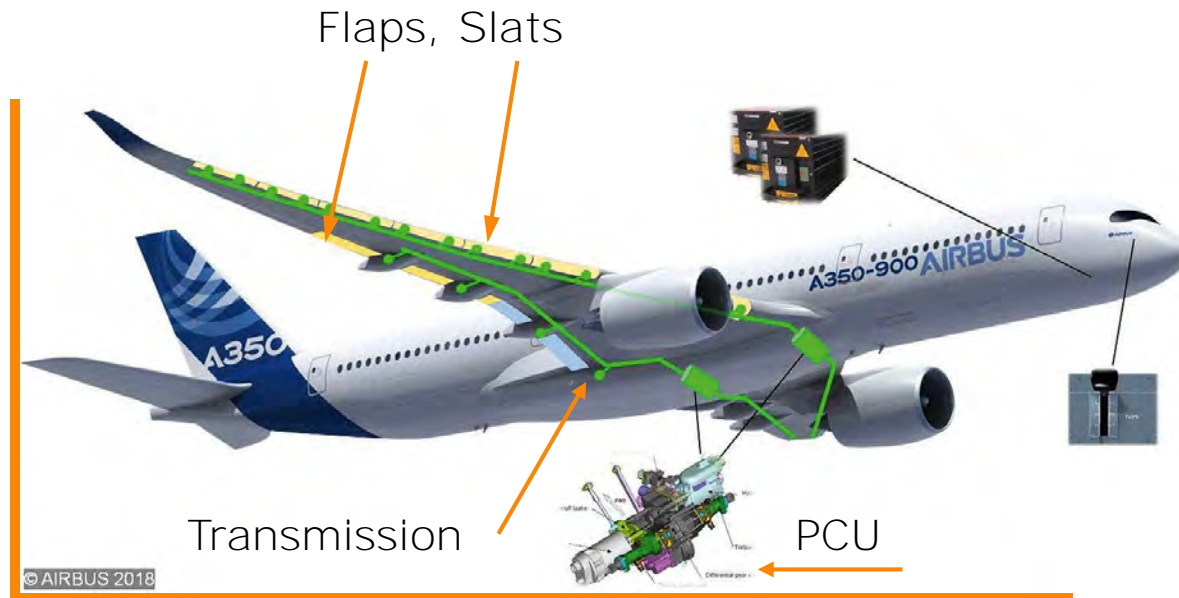
## Beispiel

- Zwei-Massen-System mit Lastzylindern

## Fazit

# Einführung

## Highlift – System eines Flugzeugs



- Optimales Start- u. Landeverhalten
- Energieeffizienz
- Funktionale Sicherheit
- Qualifikation durch umfangreiches Testprogramm

# Einführung

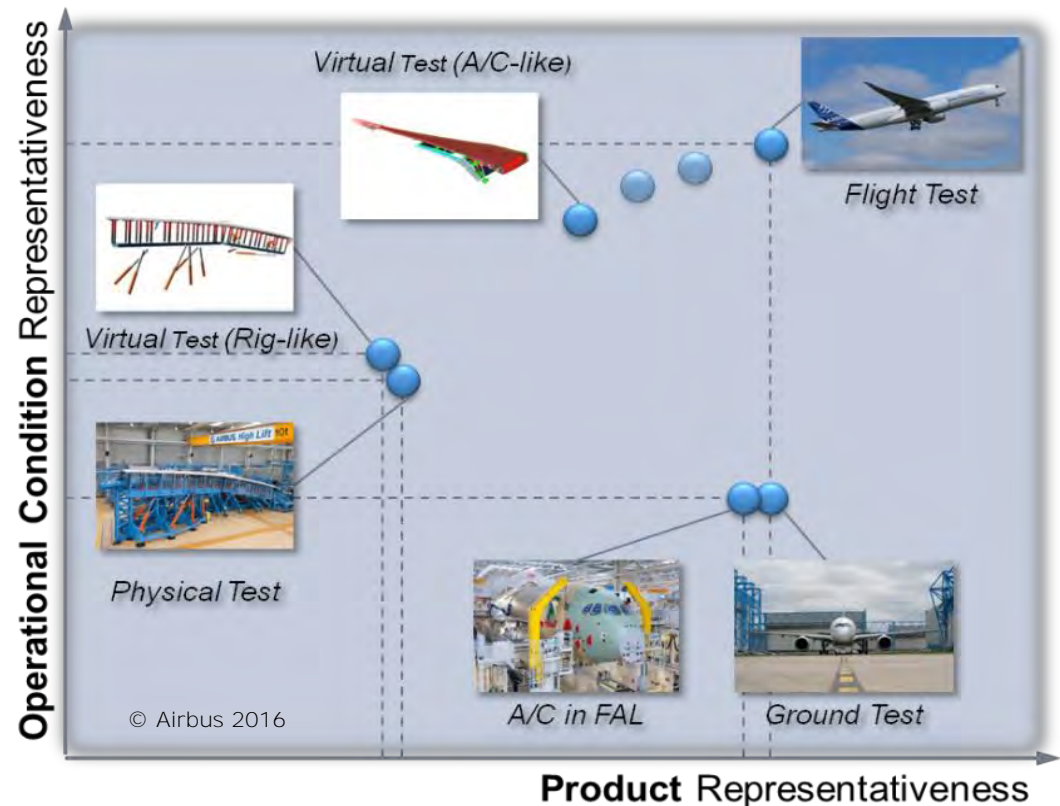
## Testverfahren

### Physikalisch:

- Realitätsnah
- Anerkanntes Testverfahren
- Originalteile
- Aufwändig, unflexibel

### Virtuell:

- Flexibel
- Kostengünstig
- Phys. Referenz notwendig
- Genauigkeit vs. Rechenzeit
- Echtzeitfähigkeit?



# Einführung

## Datenbasierte Modelle (DBM)

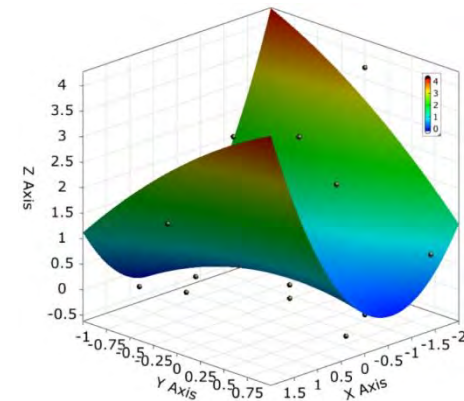
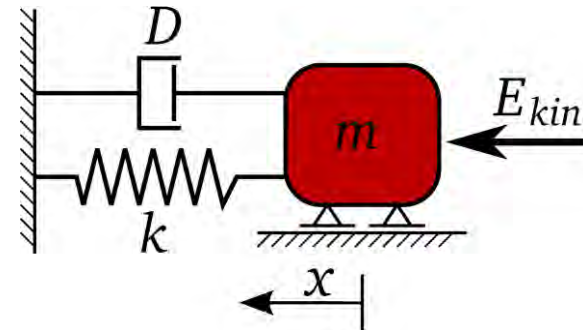
Physikalisch motiviert:

- FEM, MKS, rheologische Modelle, ...
- Reduced Order Models
- Parameteridentifikation, Modellverifikation an Tests

Mathematische Modelle:

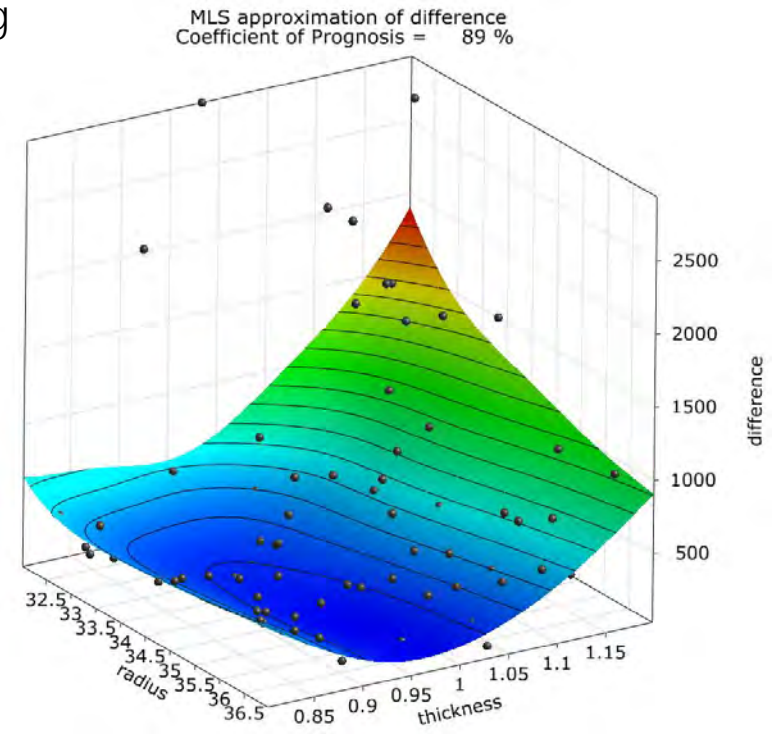
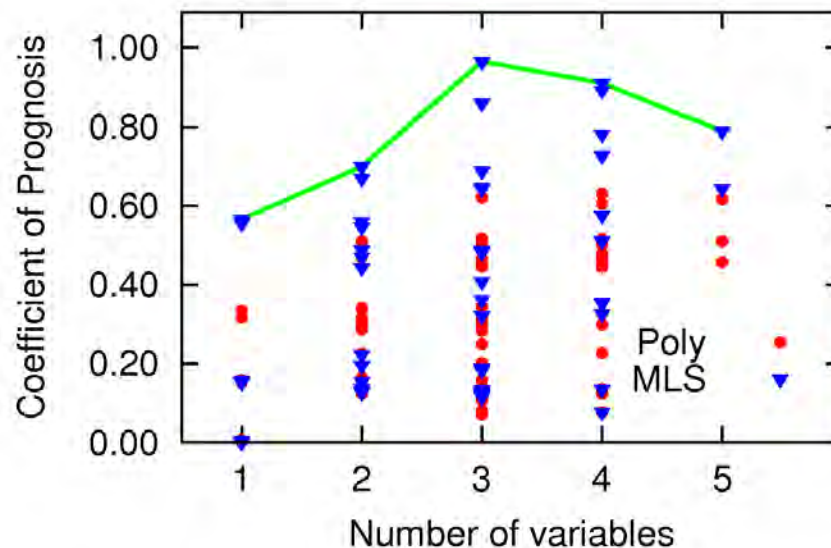
- Training an gemessenen Daten
- Regressions- bzw. Interpolationsfunktionen, Neuronale Netze, **KI**, ...
- Wahl des Funktionsansatzes und Anpassung der Parameter

➔ optiSLang:  
Metamodel of Optimal Prognosis (MOP)



# optiSLang's Metamodel of Optimal Prognosis (MOP)

- Determination of relevant parameter subspace by statistical filtering
- Determination of optimal approximation model out of several choices
- Objective measure of prognosis quality by cross validation
- Approximation of solver output by fast surrogate model without over-fitting
- Evaluation of variable sensitivities



# Projekt **VISA**

## Datenbasiertes Modell für dynamische Systeme

Anforderungen:

- Anwendung ist ein Übertragungssystem
- Das System ist zeitabhängig (Änderung von Belastung u. Eigenschaften)
- Das Modell muss als Systemkomponente mit anderen Komponenten interagieren

Anpassung eines Modells an eine Stichprobe (Design of Experiments) von dynamischen Strukturantworten, hier aus virtuellen Tests

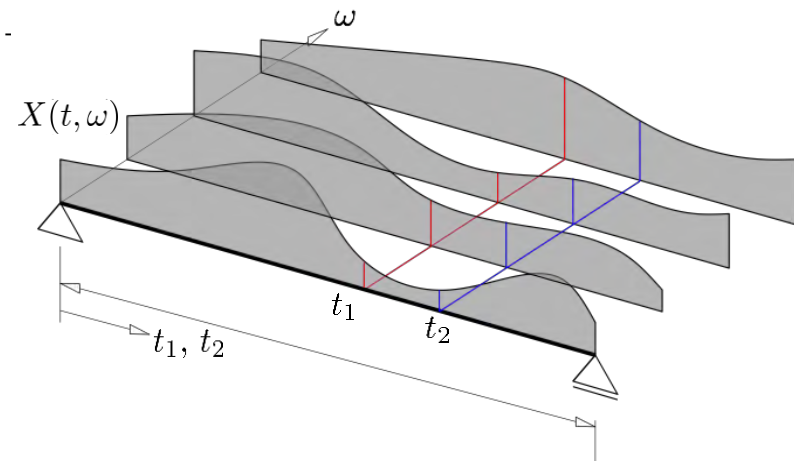


Image source: Christian Bucher: "Computational Analysis of Randomness in Structural Mechanics". Taylor and Francis. 2009

# Karhunen-Loève-Reihe

Originaldaten:  $\mathbf{X} = [X_1(t_1), X_2(t_2), \dots, X_i(t_i), \dots]^T$

Mittelwerte:  $\mu_{\mathbf{X}} = \mathbb{E}[\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots]^T$

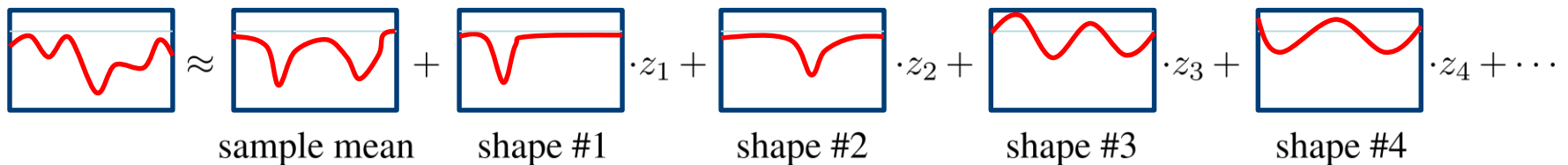
Kovarianzmatrix:  $\mathbf{C}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbb{E}[(X_i - \mu_{X_i})(X_j - \mu_{X_j})]$

Eigenwertzerlegung:  $\mathbf{C}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \Phi \Lambda \Phi^T = \sum \lambda_i \phi_i \phi_i^T$

Transformation:  $\mathbf{Z} = \Phi^T (\mathbf{X} - \mu_{\mathbf{X}})$

mit:  $\mathbf{C}_{\mathbf{Z}\mathbf{Z}} = \Lambda; \quad \sigma_{Z_i}^2 = \lambda_i; \quad \rho_{Z_i Z_{j \neq i}} = 0$

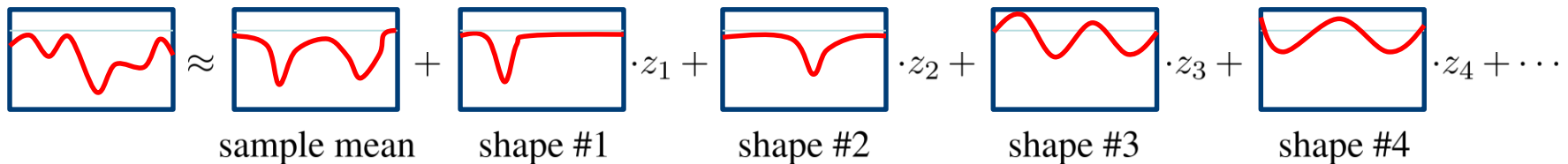
Umkehrung:  $\mathbf{X} \approx \Phi \mathbf{Z} + \mu_{\mathbf{X}}$



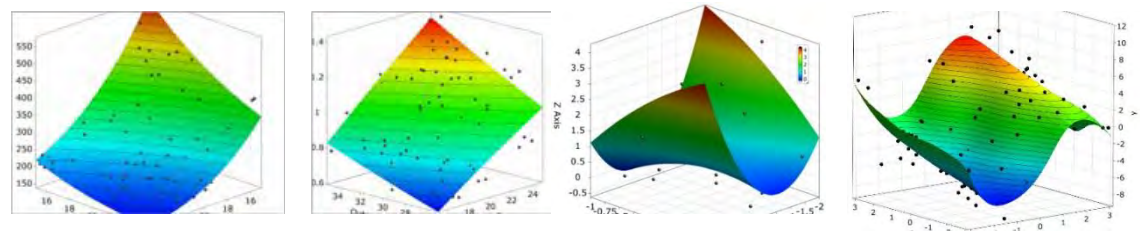


# Feld-Metamodell

1. Koordinatentransformation durch Karhunen-Loève-Entwicklung:  
Darstellung der Zeitreihen (= "Feldgrößen") durch skalare Parameter  $\mathbf{Z}$



2. Modellierung der skalaren Parameter  $\mathbf{Z}$  durch mathematische Ansätze (Metamodel of Optimal Prognosis)



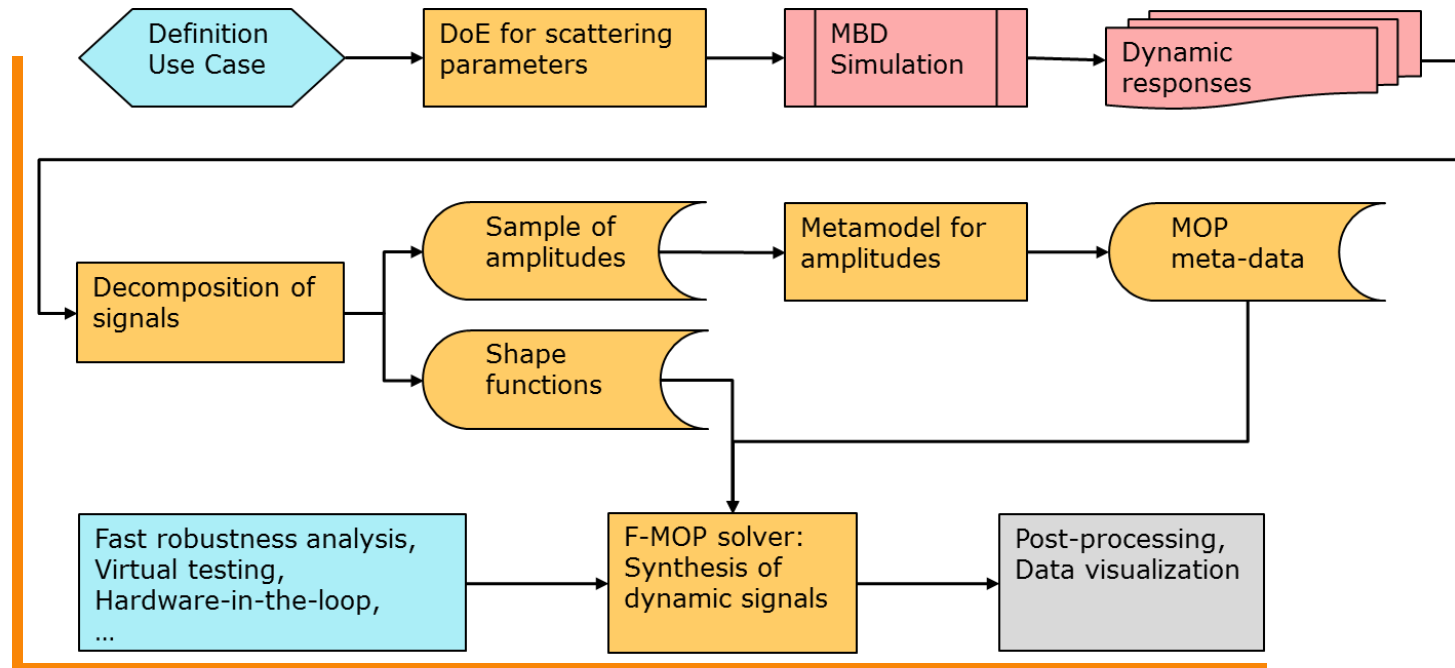
3. Black-box Modell



# Feld-Metamodell

## Eigenschaften

- Reduzierung der Dimension durch Abschneiden der Reihenentwicklung
- Sensitivitätsanalyse der Eingangsgrößen auf die Zeitreihe
- Zeitreihe für gegebene Eingangsgrößen liegt a priori fest
- ➔ Keine Interaktion (veränderliche Lasten) möglich
- ➔ Kein dynamisches System (veränderliche Parameter)



## Dynamisches DBM

Zeitintegration unter Verwendung gegebener Metamodelle/Formfunktionen

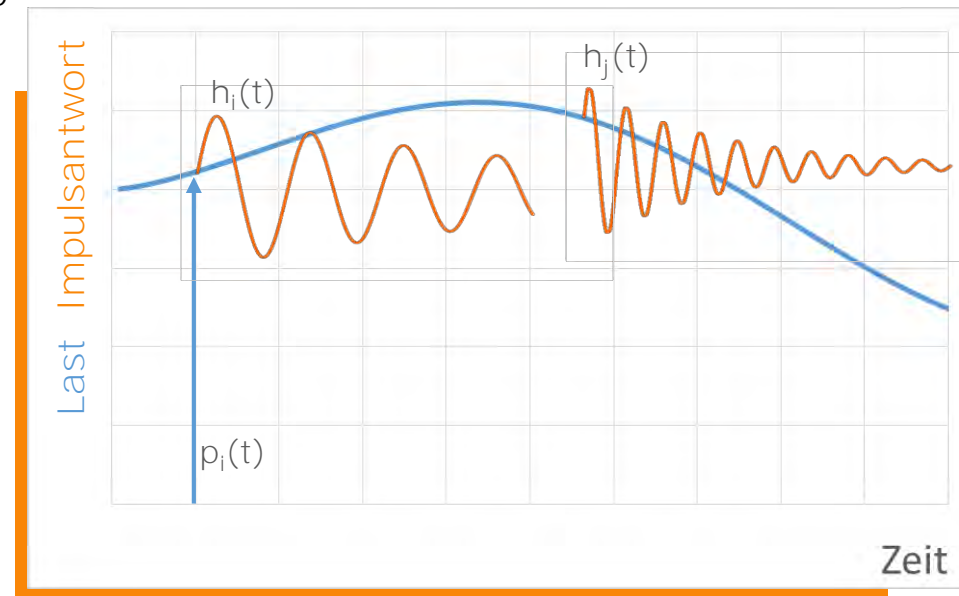
- Training der Modelle
  - Design of Experiments für Systemparameter
  - Anregung durch Einheits-Impulse
  - Impulsantwort:  $h(t) = \exp(-\zeta \omega t) \frac{1}{m\omega} \sin(\omega t)$
  - Feld-Metamodell für Impulsantworten
- Lösung im Zeitbereich mit Duhamel Integral
  - Überlagerung der Impulsantworten

$$x(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t p(\tau) h(t - \tau) d\tau; \quad t > 0$$

## Dynamisches DBM

Zeitvariantes (dynamisches) System

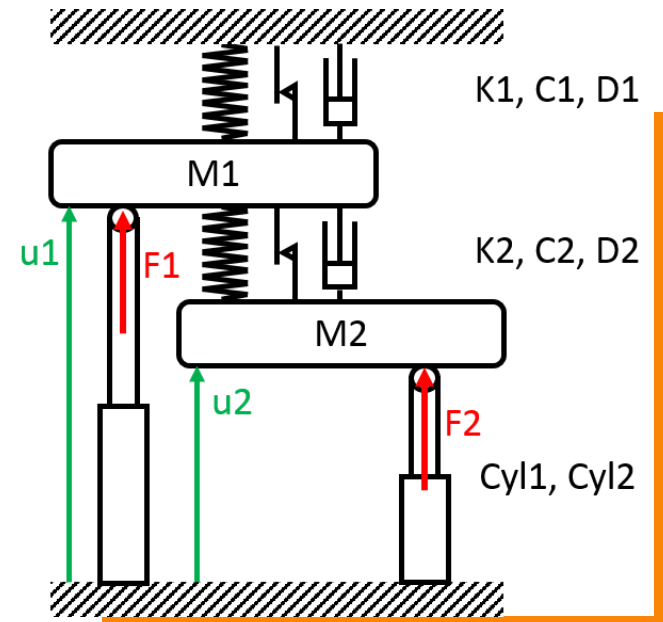
- Interaktion mit anderen Komponenten,
- veränderliche Belastung:
  - Skalierung der Impulsantworten mit jeweils aktueller Belastung
- Veränderliche Systemparameter:
  - Aktualisierung der Impulsantworten durch Abrufen des F-MOP
- Übergangsbedingungen,
- nichtlineares Verhalten:
  - Gleichgewichts – Iteration in jedem Zeitschritt
  - Re-Skalierung der Belastung



# Beispiel

## Zwei-Massen-Schwinger mit Lastzylinder

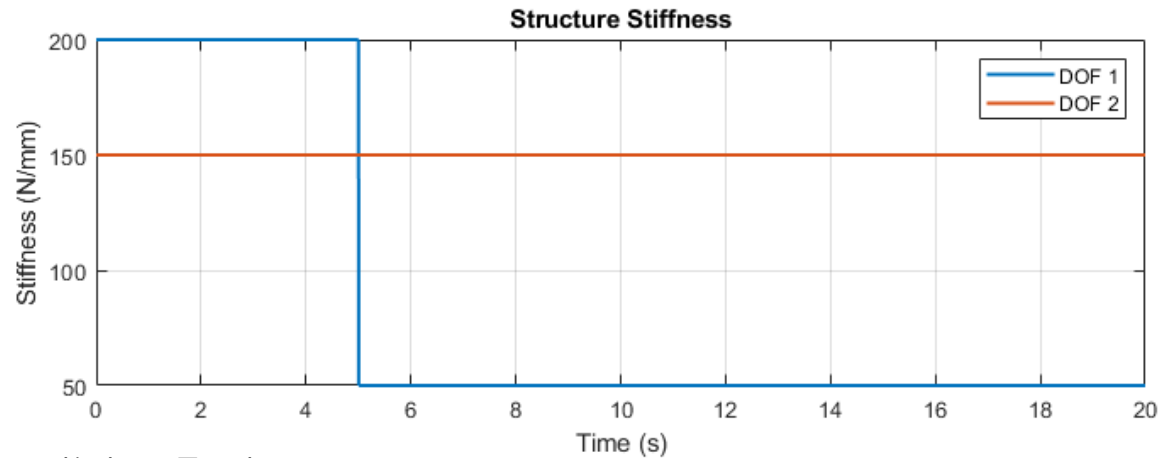
- "Struktur" aus 2 Massen, Feder, viskose Dämpfung und Reibung
  - Belastung durch zwei geregelte Lastzylinder inkl. innerer Reibung u. adiabatischem Effekt
  - Alle Kräfte in einer Wirkungslinie
  - Interaktion: Rückkoppelung der Verschiebungen und Geschwindigkeiten der Struktur
  - Ersetzen der Struktur durch DBM
- 
- Simulation (Referenz) in MATLAB/Simulink
  - DBM: optiSLang-Bibliothek an MATLAB gebunden



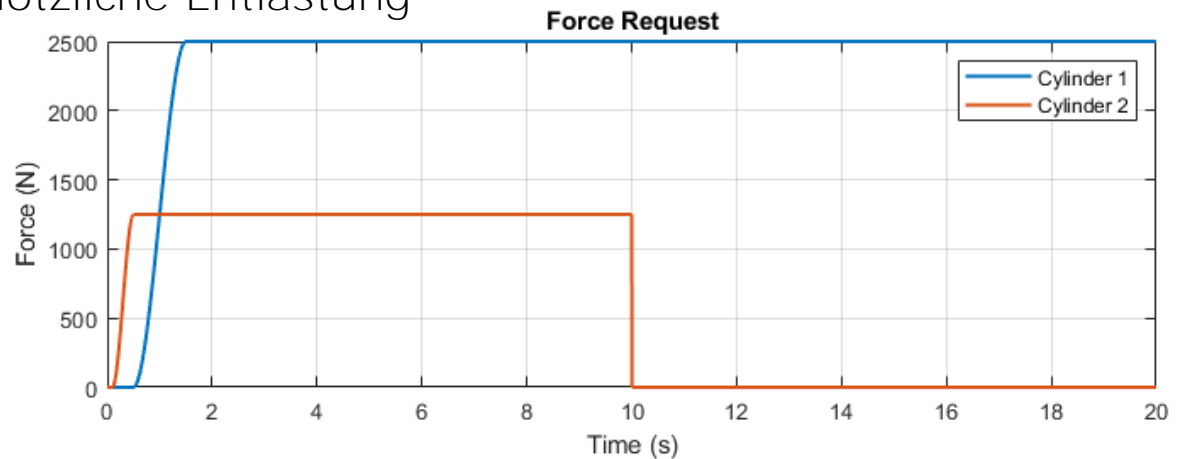
# Beispiel

## Testfall

- Plötzlicher Steifigkeitsabfall an DOF #1



- Schnelle Be- und plötzliche Entlastung

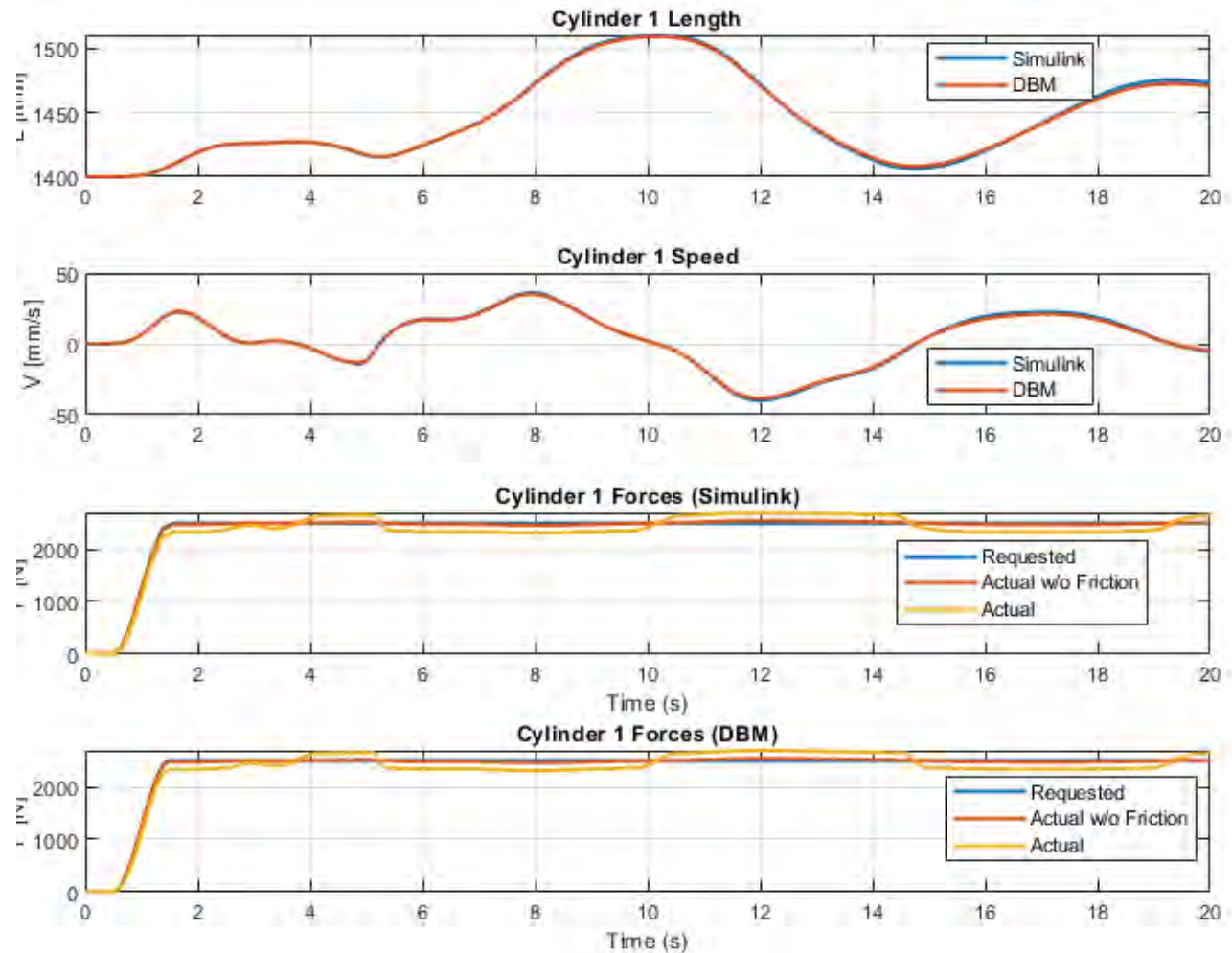


# Beispiel

Vergleich Referenz vs. DBM

DOF #1

- Verschiebung Lastzylinder
- Geschwindigkeit Zylinder
- Kräfte am Lastzylinder, Referenz
- Kräfte, DBM

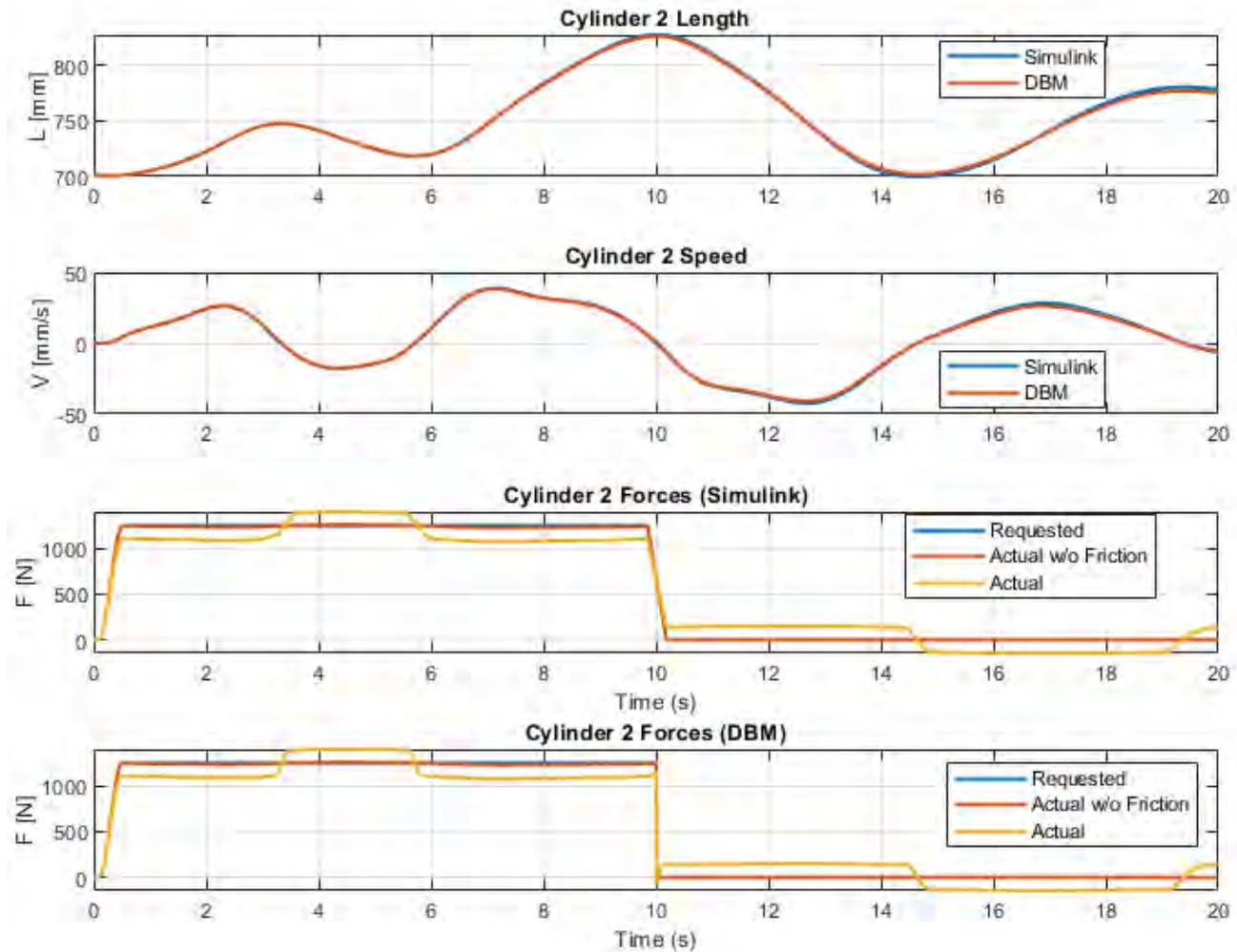


# Beispiel

## Vergleich Referenz vs. DBM

### DOF #2

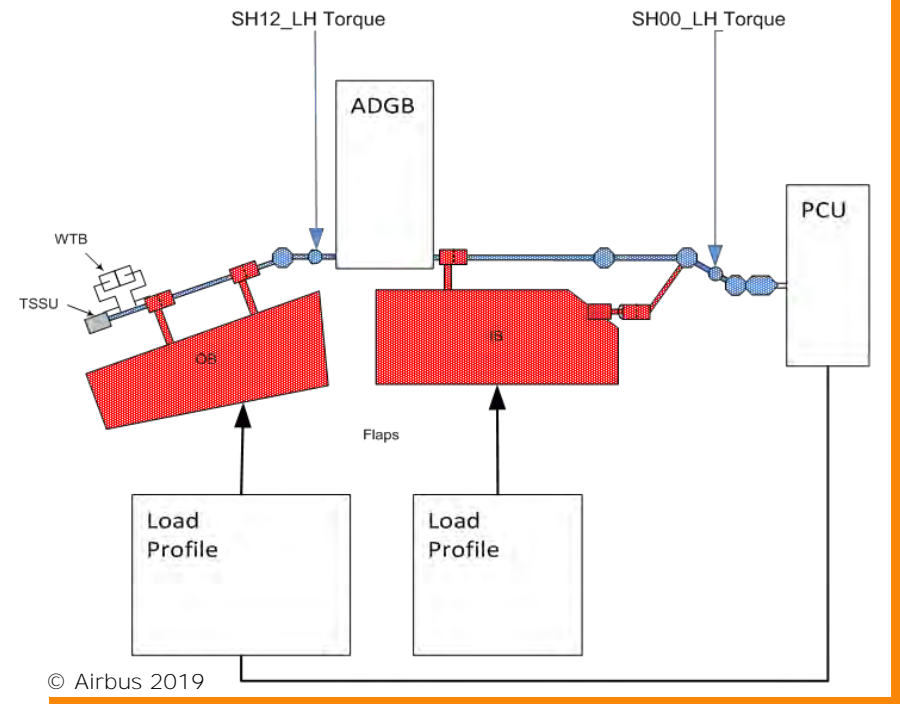
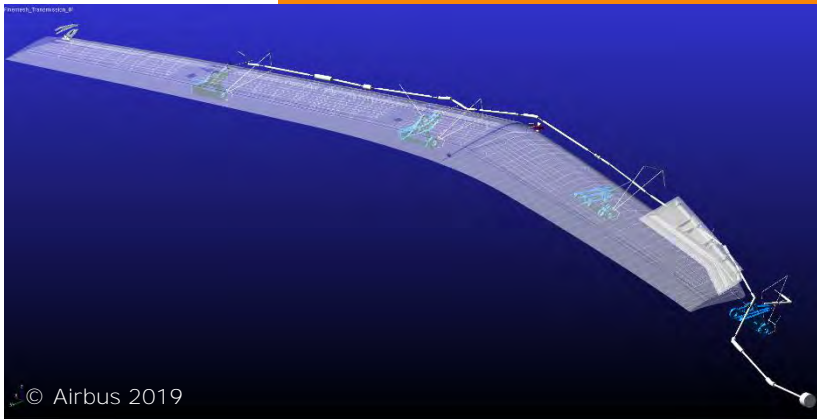
- Verschiebung Lastzylinder
- Geschwindigkeit Zylinder
- Kräfte am Lastzylinder-Referenz
- Kräfte-DBM für Struktur





# Ausblick

## High Lift System eines Airbus



- Referenz/Training: Detailliertes Modell
- Interaktion mit Antrieb (PCU)

# Fazit

## Ziele

- Ersetzen bzw. Ergänzen von physikalischen Tests durch datenbasierte Modelle (DBM)
- Anforderungen an DBM: Interaktion, veränderliche Eigenschaften, Echtzeitfähigkeit

## Methode

- Mathematisch motiviertes Modell basierend auf Karhunen-Loève-Zerlegung einer Stichprobe der dynamischen Strukturantworten
- Training des Modells für Einheitsimpuls – Belastung
- Lösung im Zeitbereich über Duhamel Integral
- Gleichgewichts – Iteration im Zeitschritt

## Ausblick

- Gekoppelte physikalisch-virtuelle Versuche
- Digitaler Zwilling
- Schnelle Simulation (z.B. funktionale Zuverlässigkeit)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

veit.bayer@dynardo.de

## Danksagung

Förderung im Rahmen des Luftfahrt –  
Forschungsprogramms LuFo V.3  
des Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Energie

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**