

# Aktuelle Entwicklungen des DLR im Bereich der lidargestützten Lastminderungsfunktionen für industrierelevante Flugzeugkonfigurationen

C. Wallace\*, N. Fezans\*, D. Cavaliere<sup>§</sup>\*, D. Kiehn\*, P. Vrancken<sup>#</sup>

\* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Flugsystemtechnik

# Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre

§ Technische Universität Braunschweig - Cluster of Excellence SE<sup>2</sup>A  
*Sustainable and Energy-Efficient Aviation*

**Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress**

03.09.2020



Knowledge for Tomorrow

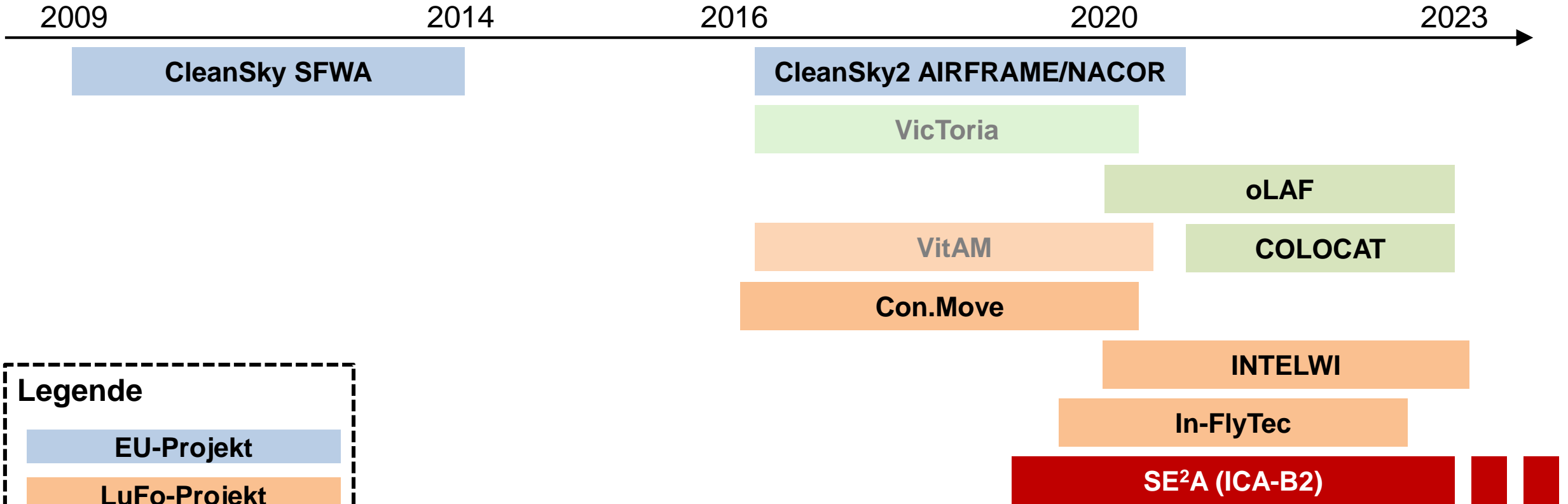


# Inhalt des Vortrags

- Einordnung lidargestützter Böenlastabminderung in aktuelle Projektlandschaft
- Zusammenhang zwischen Gust Load Alleviation (GLA) und energieeffizienterem Fliegen
- Grundlagen der lidargestützten Lastabminderung
- Wissenschaftliche Fragestellungen
- Beschreibung der Gesamtsystemdynamik
- Merkmale des Syntheseprozesses
- Anforderungen und Umsetzung durch einen generischen Syntheseprozess / Tool
- Zusammenfassung und Ausblick



# Einordnung lidargestützter Böenlastabminderung in Projektlandschaft



**Legende**

- EU-Projekt
- LuFo-Projekt
- DLR-internes Projekt
- Exzellenzcluster

Projektpartner



und weitere...



# Gust Load Alleviation und energieeffizienteres Fliegen

- Die auf das **Flugzeug im Betrieb wirkenden Lasten** lassen sich in eine **Lastfallhierarchie** einordnen
- Lastfallhierarchien lassen sich für jeden **strukturellen Punkt bestimmen**, wobei der **dominierende Lastfall strukturdimensionierend sein kann**
- Vorhandene Manöverlastabminderung (MLA) kann zu **einer von Böen dominierten Lastfallhierarchie** führen
  - **Differenz** zwischen dimensionierenden **Böen- und Manöverlasten** stellt ein erhebliches **Potenzial** zur **Lastminderung** dar
  - Ein am **Tragflügel reduziertes Böenlastniveau** eröffnet Möglichkeiten zu **konstruktiven Modifikationen** am Flugzeug

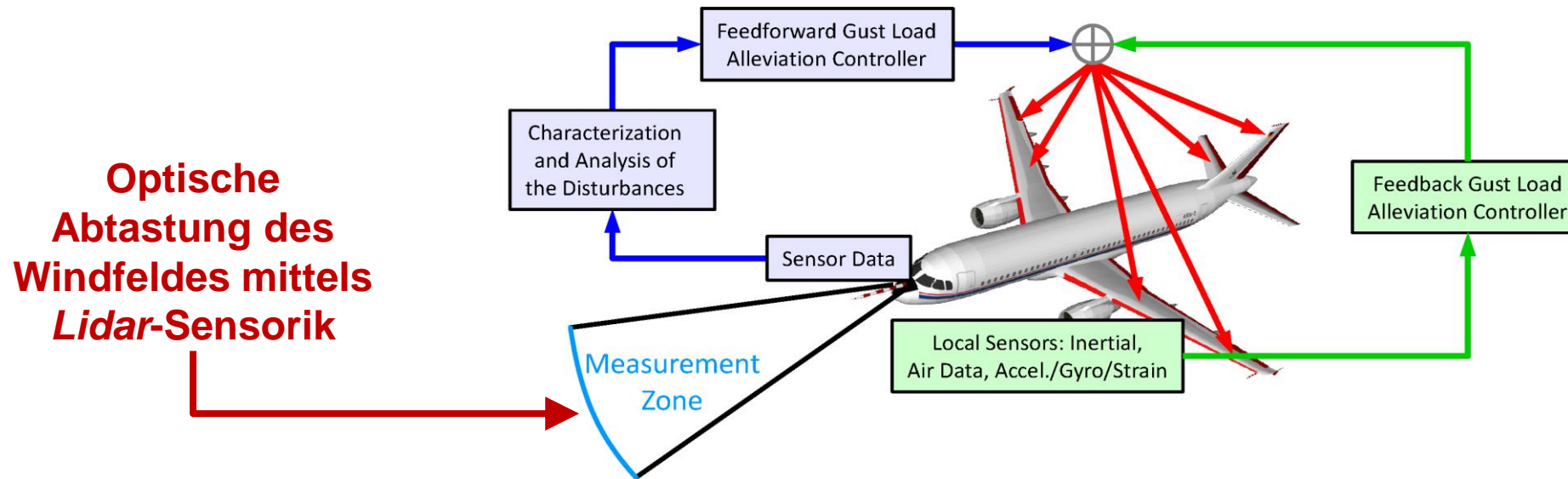
Reduktion der strukturellen Masse



Regelungsfunktion mittels  
Böenstöraufschaltung zur Lastabminderung



# Grundlagen zur lidargestützten Böenlastabminderung



## **Feedback** – Böenlastabminderung

## **Feedforward** – Böenlastabminderung

- Fähigkeit zur Antizipation zukünftiger Böen (Störungen)
  - Agiert **im Vorfeld** des Böendurchflugs durch gezielte Beeinflussung der Flugzeugbewegung durch intelligente Kommandoallokation bzgl. der Steuerflächen

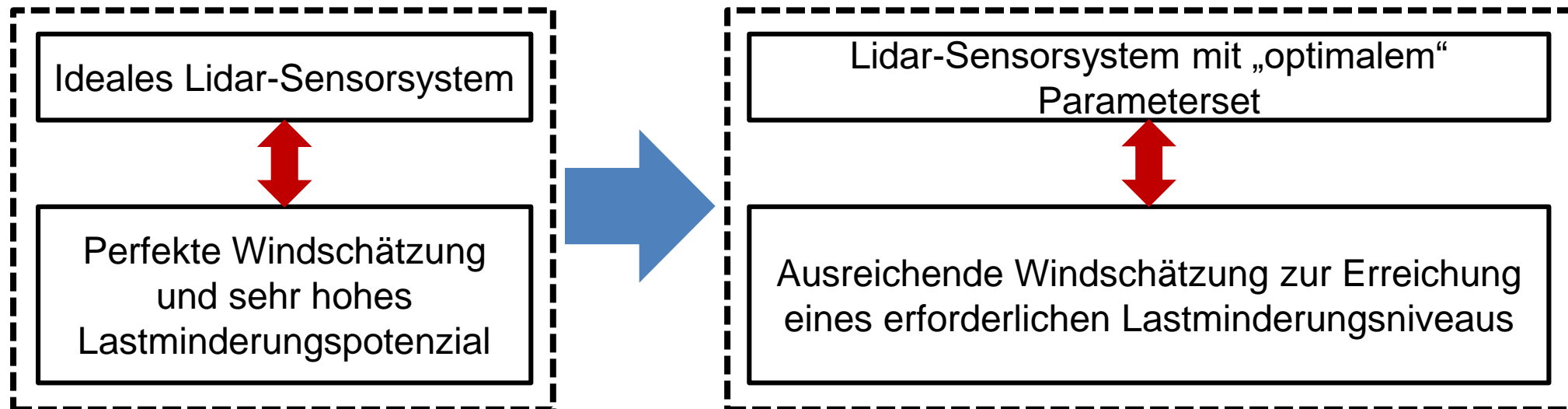
- Keine Fähigkeit zur Antizipation zukünftiger Böen (Störungen)
  - Agiert **in Reaktion** auf den Böendurchflug
    - Kompensiert verbleibende Böenlasten durch intelligente Kommandoallokation bzgl. der Steuerflächen
- Fähigkeit zur gezielten Dämpfung *elastischer* Strukturmoden



# Wissenschaftliche Fragestellungen (1/2)

- **Wissenschaftliche Fragestellungen** im Vorentwurf:

- Welches Lastminderungspotenzial ist durch die Implementation eines lidarbasierten Reglers erreichbar?
- Welches Lastminderungsniveau ist erforderlich und wie beeinflusst es die notwendige Komplexität des Lidar-Sensors?
  - Identifikation einer Sensorkonfiguration minimaler Komplexität und „Kosten“ bei gleichzeitiger Erfüllung der Mindestanforderungen an die Lastminderung

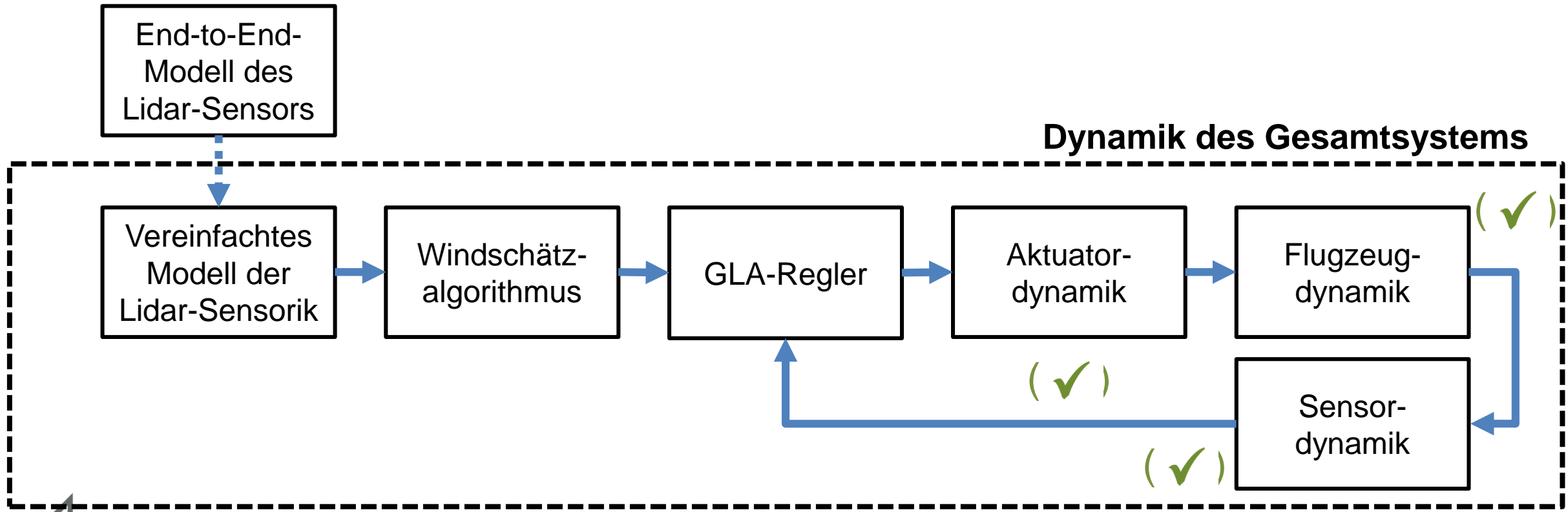


# Wissenschaftliche Fragestellungen (2/2)

- **Wissenschaftliche Fragestellungen** im Vorentwurf:

- Welche technische Voraussetzung muss erfüllt sein, um die vorherigen Fragen zu beantworten?

- **Existenz einer Simulation des Gesamtsystems**

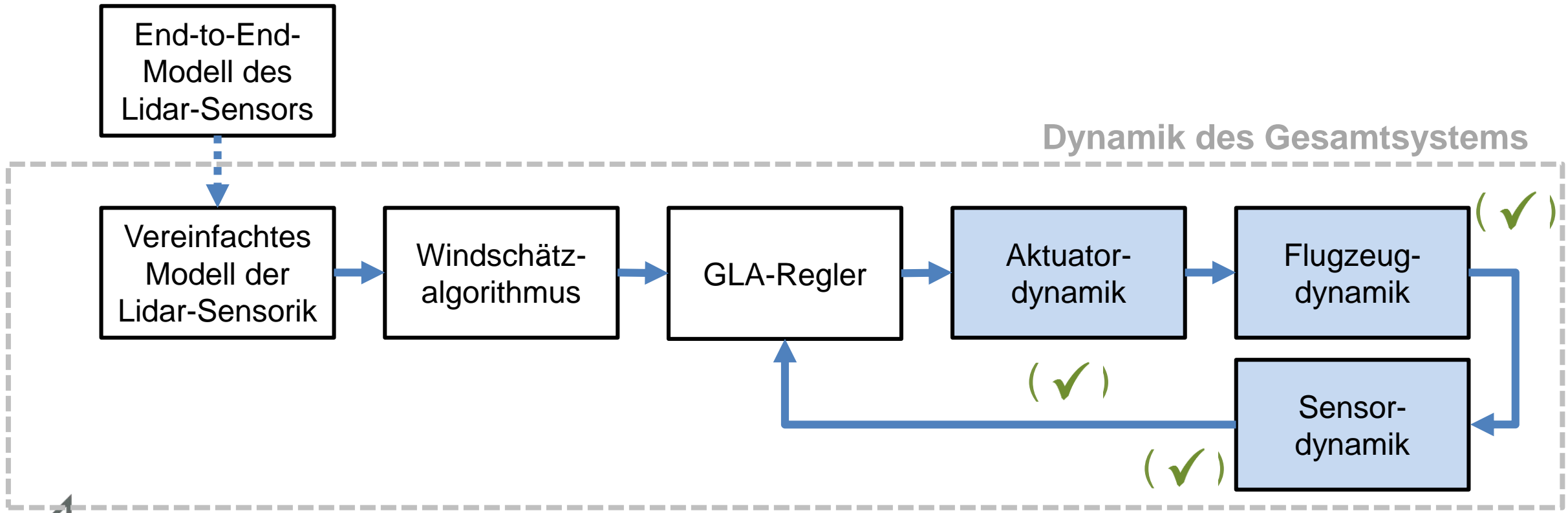


# Wissenschaftliche Fragestellungen (2/2)

- **Wissenschaftliche Fragestellungen** im Vorentwurf:

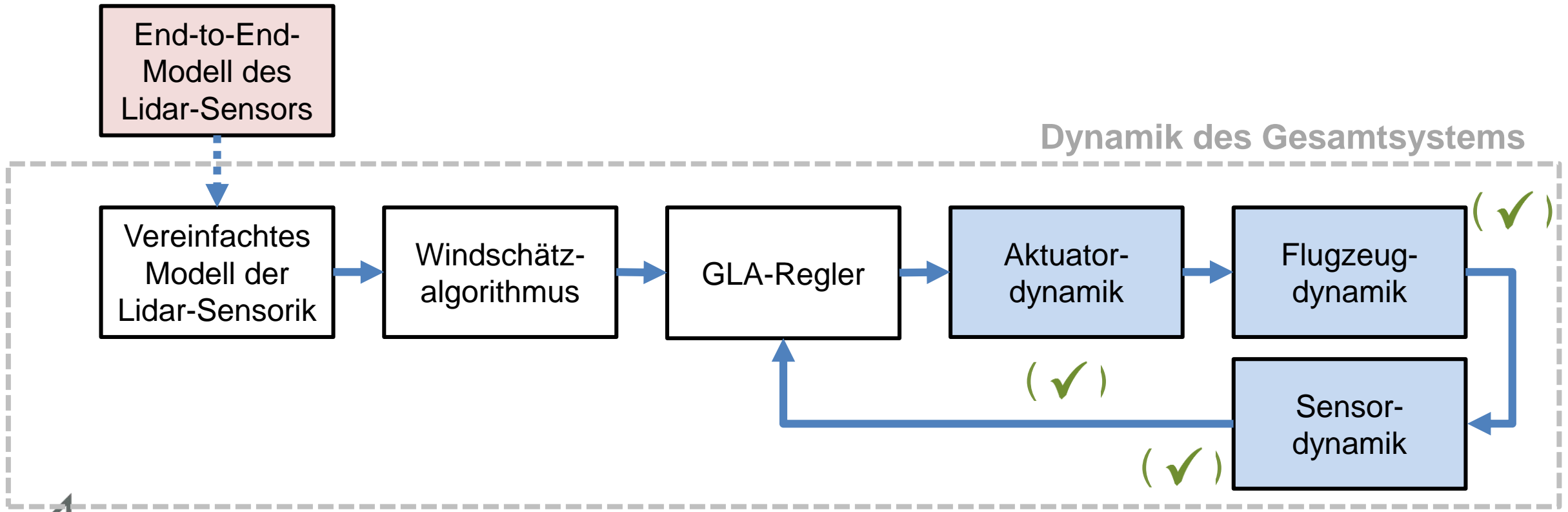
- Welche technische Voraussetzung muss erfüllt sein, um die vorherigen Fragen zu beantworten?

- **Existenz einer Simulation des Gesamtsystems**





# Komponenten einer Gesamtsystemsimulation



# Modell des Lidar-Sensors (1/2)

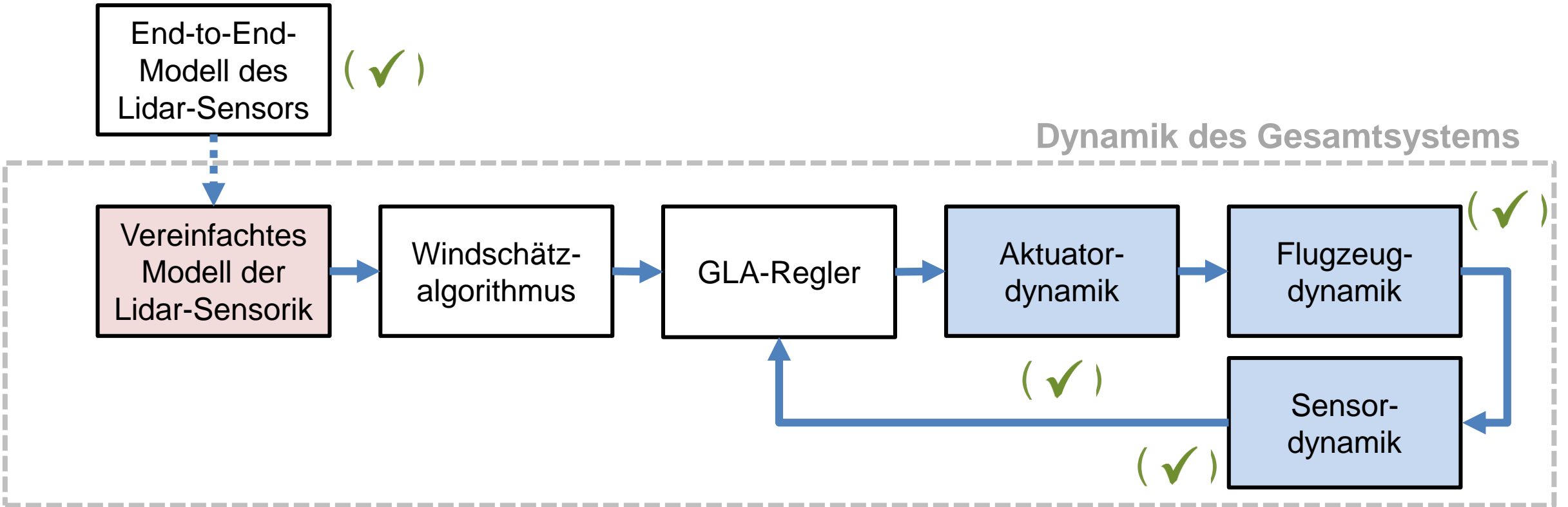
- **Detailliertes End-to-End-Lidar-Simulationsmodell (DLR Institut für Physik der Atmosphäre)**
  - Sensorbeschreibung basiert auf den physikalischen Prozessen der Atmosphäre, des Sensors und aller Sensorsubsysteme
  - Modellbildung erlaubt eine Parametervariation jedes Subsystems und damit Änderung der Eigenschaften des Gesamtsystems
  - Messrauschen ist in allen relevanten Stufen des Detektionsprozesses implementiert
  - Modellbildung unterstützt und validiert durch diverse Demonstrationen und Experimente

*“Measurement Characteristics” = f ( “Sensor Parameters” & “Atmosphere Parameters” )*

**Zu aufwendig** für die Implementierung in den Vorentwurf eines lidarbasierten GLA-Reglers



# Komponenten einer Gesamtsystemsimulation



## Modell des Lidar-Sensors (2/2)

### • Vereinfachtes Simulationsmodell

- Deutlich vereinfachtes Modell verglichen mit dem End-to-End-Lidar-Modell
- Makroskopische Repräsentation der Eigenschaften und Detektionsperformance einer gegebenen Lidar-Sensorkonfiguration
- Lässt sich aus dem physikbasierten End-to-End-Modell herleiten
- Geeignet für Kopplung mit aeroelastischen Flugzeugmodellen und lidarbasierten GLA-Reglern

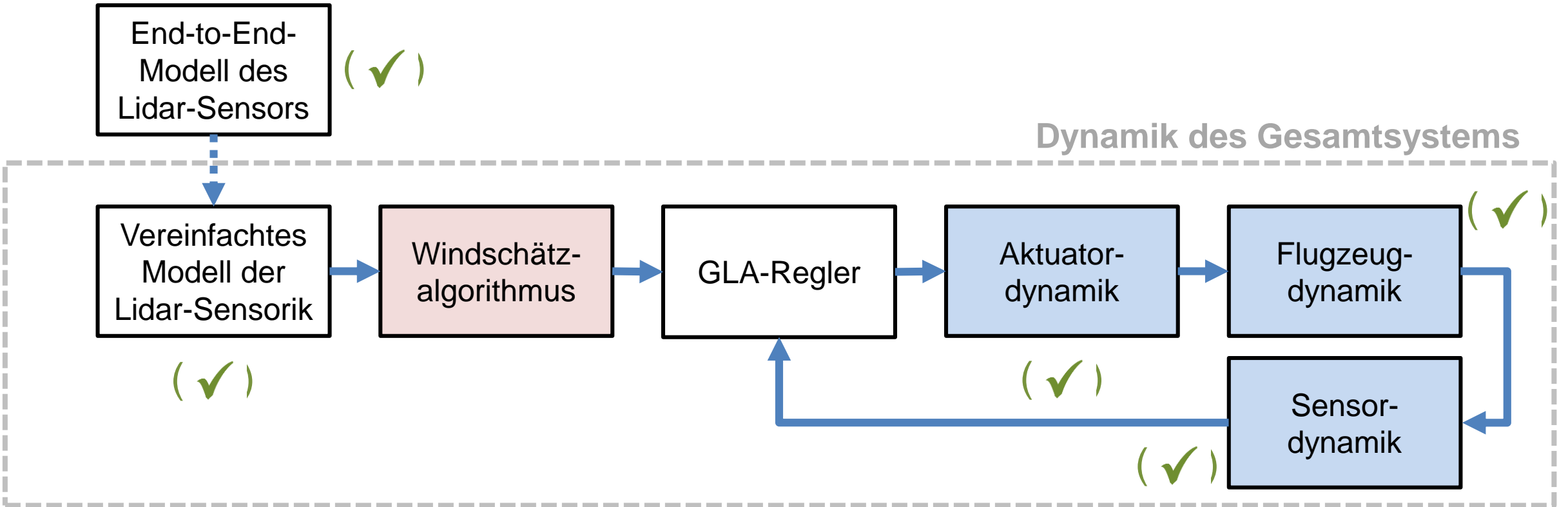
**Performantes Modell** als  
Voraussetzung für schnelle  
Reglererstellung im Vorentwurf



Ermöglicht zusätzlich Analysen zur  
Komponentenperformance auf  
**Gesamtsystemebene**

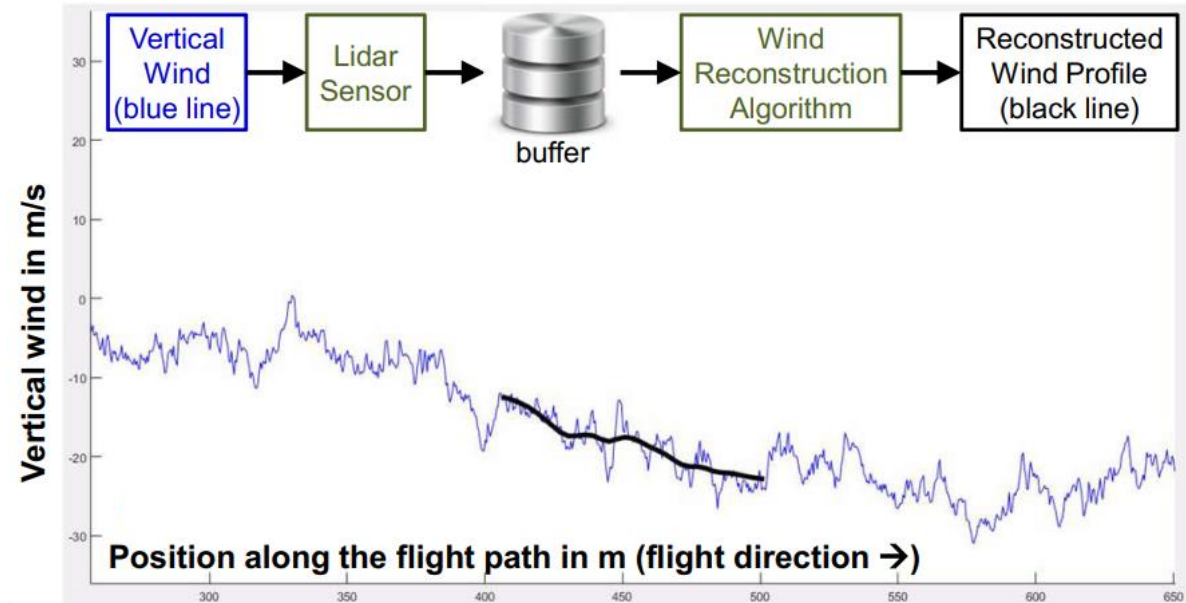
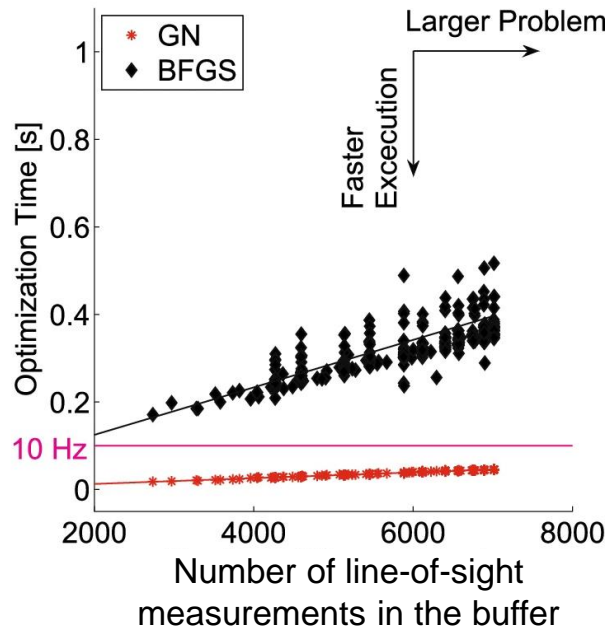


# Komponenten einer Gesamtsystemsimulation



# Online-Windrekonstruktionsalgorithmus

- Algorithmus wurde in **CleanSky** entwickelt und in **CleanSky2** deutlich verbessert
- Deutliche **Performance-Verbesserungen** (Rechenzeit und Speicherbedarf nun deterministisch)

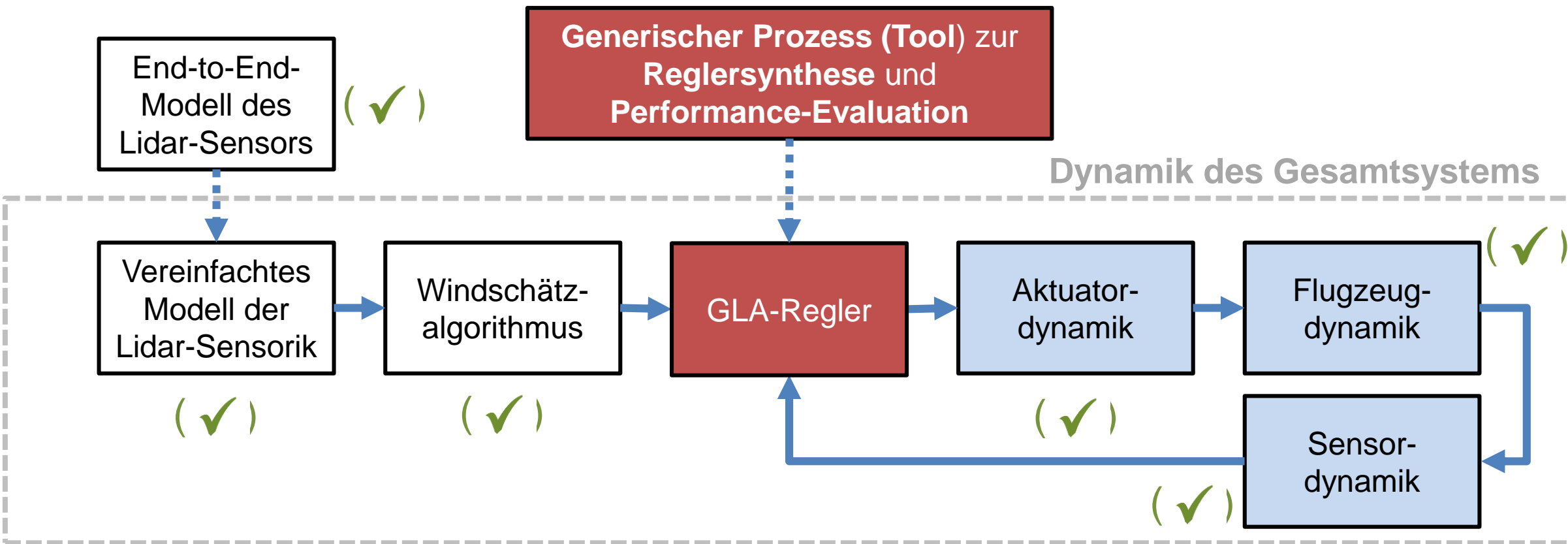


- Insbesondere geeignet zur Antizipation langwelliger / großformatiger Windfelder

Fezans, Nicolas; Schwital, Jana und Fischenberg, Dietrich (2017) **In-Flight Remote Sensing and Identification of Gusts, Turbulence, and Wake Vortices Using a Doppler LIDAR**. CEAS Aeronautical Journal **8**, Seiten 313-333. [10.1007/s13272-017-0240-9](https://doi.org/10.1007/s13272-017-0240-9)

Fezans, Nicolas; Joos, Hans-Dieter und Deiler, Christoph (2019) **Gust load alleviation for a long-range aircraft with and without anticipation**. CEAS Aeronautical Journal **10**, Seiten 1033-1057. [10.1007/s13272-019-00362-9](https://doi.org/10.1007/s13272-019-00362-9)

# Komponenten einer Gesamtsystemsimulation

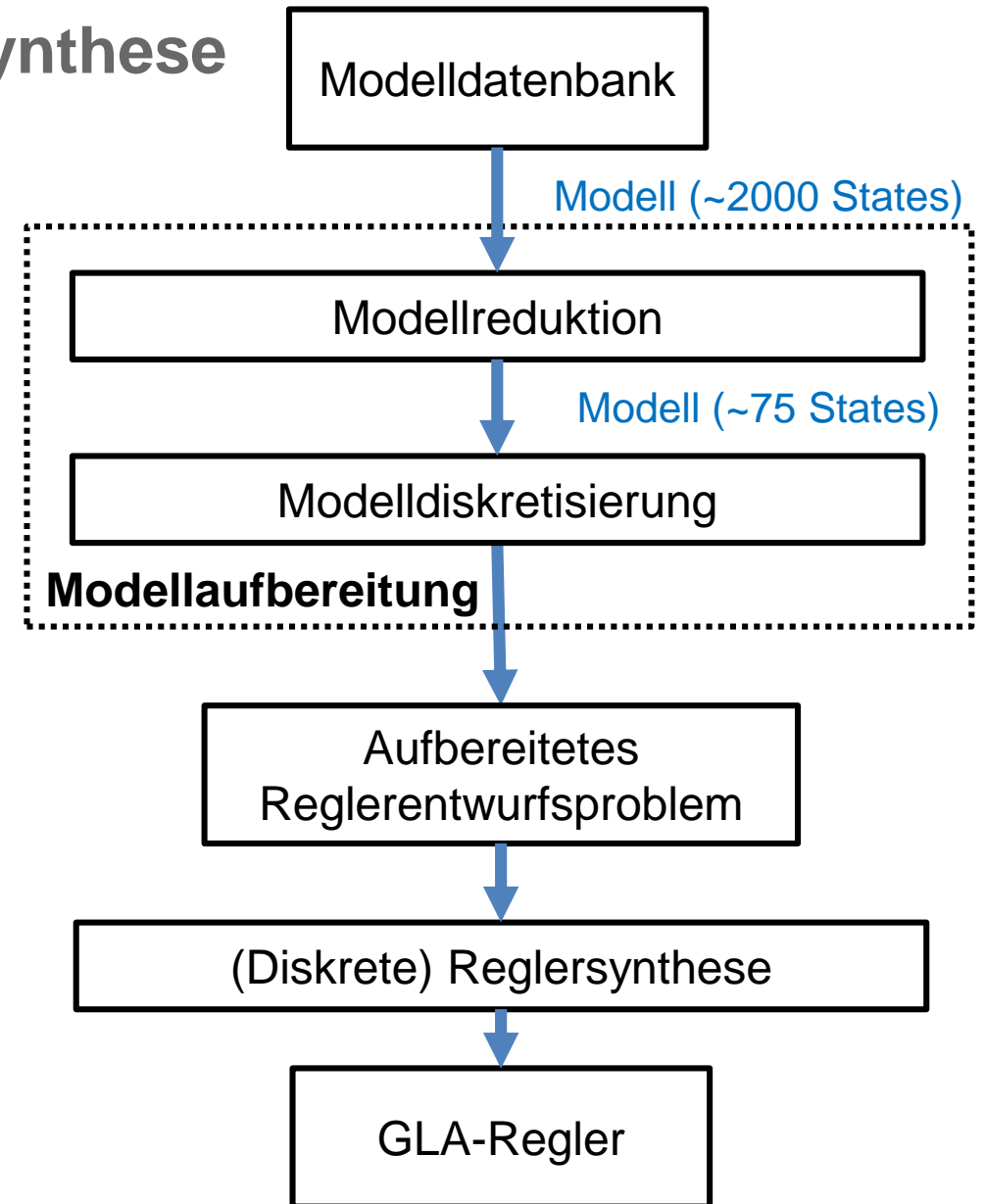


# Grundsätzlicher Prozessablauf der Reglersynthese

## • Randbedingungen der Reglersynthese

- Die Synthese eines GLA-Reglers soll
  - mit **vertretbarem Rechenaufwand**,
  - im **kontinuierlichen/diskreten Zeitbereich**,
  - im Rahmen der Beibehaltung einer möglichst ursprünglichen **Flugzeugdynamik**,

...im Ergebnis mit einem möglichst **optimalen Regler** (im Sinne der erwünschten Lastminderung) erfolgen.

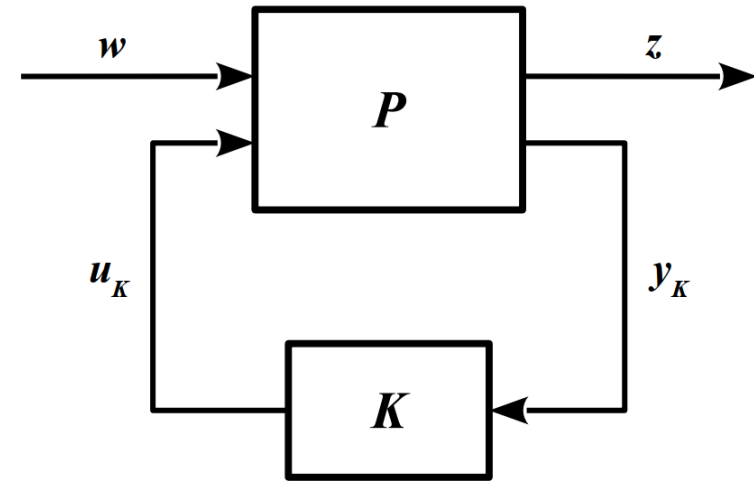




# Definition der Reglerzielfunktion über Performance-Channels

- Repräsentation des **Optimierungsziels** über die Definition von Kostenfunktionen (**Performance-Channels**)

- **Geometriespezifisches** Optimierungsziel
- **Lastartspezifisches** Optimierungsziel
  - **(Frequenzspezifische) Gewichtung** obiger Optimierungsprobleme durch Filterung



- **Mehrzieloptimierung** durch Wahl **beliebig vieler** Performance-Channels möglich

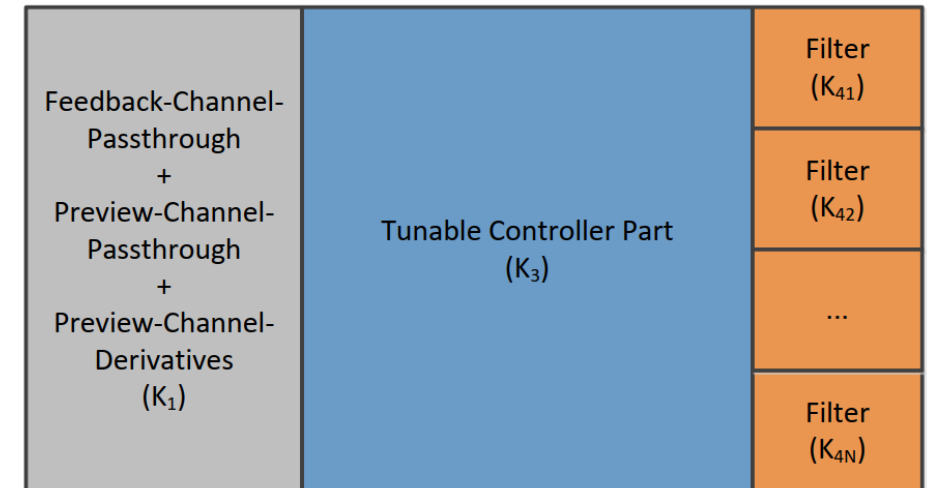
- **Beispiel:**

- Windeingang → Ausgang Biegemoment am Innenflügel
- Windeingang → Ausgang Biegemoment am Außenflügel
- Windeingang → Ausgang Torsionsmoment am Innenflügel
- Windeingang → Ausgang ...



# Implementation einer parametervariablen Reglerstruktur

- Zur Lösung des gestellten Optimierungsproblems ist eine **parameterveränderliche Reglerstruktur (LTI/State-Space-Formulierung)** hinterlegt
  - Möglichkeit der **Variation der Ordnung** des Reglers
  - Implementierung **verschiedener Reglerkonfigurationen**
    - Reiner Feedforward-Regler
    - Kombiniertes Feedforward-/Feedback-Regler
    - Reiner Feedback-Regler
  - Einbindung in die Umgebung einer **Basis-Flugreglerstruktur** möglich
  - Zusätzlich ist eine Filterung der generierten Reglerkommandos möglich



# Projektspezifische Anforderungen an die Reglersynthese

- **Viele Modelle und Projekte → Flexibles / generisches Tool!**

- **Modell- und projektspezifische Anforderungen**

- Analyse unterschiedlicher Flugzeugmodellstrukturen

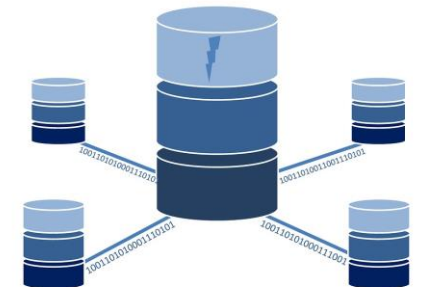
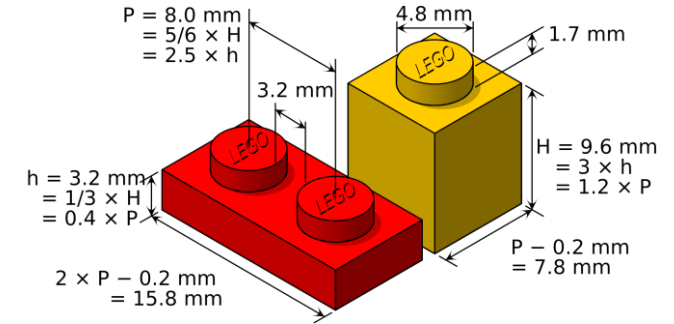
- Variierende Größe, Konstitution sowie dynamische Eigenschaften
- Erfordert individuelle Modellaufbereitungsstrategien (spezifischer Prozessablauf)
- Beliebige und flexible Variation des Ablaufs einzelner Prozessschritte

- **Umsetzung durch einen modularisierten Aufbau bestehend aus einzelnen Funktionen mit vordefinierten Schnittstellen**

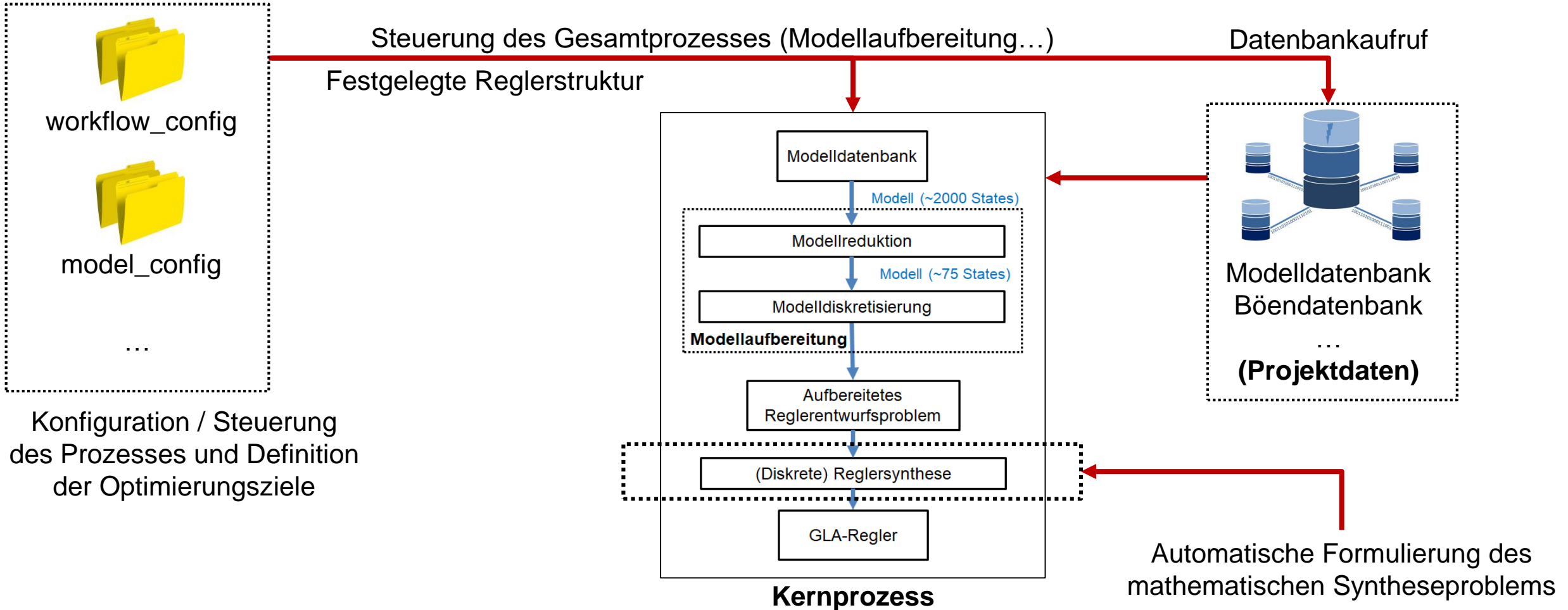
- **Flexible und projektübergreifende Nutzung der Code-Bestandteile**

- Analyse unterschiedlicher Flugpunkte, Massenkonfigurationen und Bönenfälle
- Berücksichtigung spezifischer Zielvorgaben

- **Dynamischer Aufruf und Analyse sowie zentrale Integration externer projektspezifischer Datenbanken**



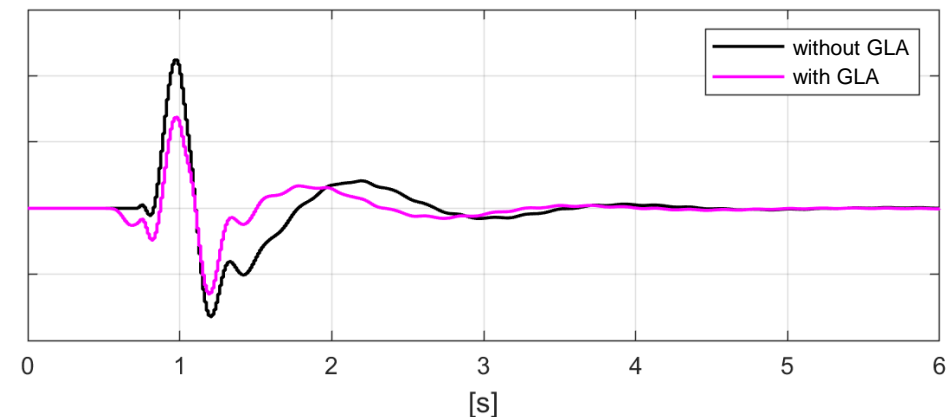
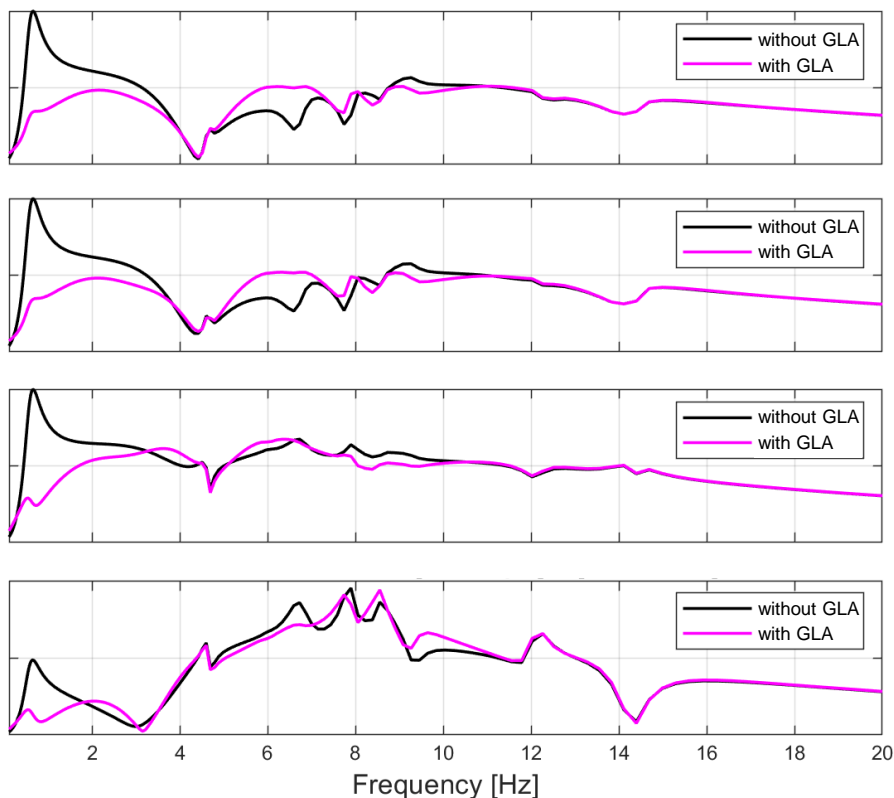
# Entkopplung der Modellprozessierung



Entkopplung von Anforderungen / Optimierungszielen / Projektdaten und Modellprozessierung

# Ergebnisse der Lastminderung (beispielhaft / Aus CleanSky2 – GBJA)

Übertragungsverhalten: **Wind** → **Biegemoment**



**Zeitsimulation des Biegemoments  
an der Flügelwurzel  
während des Durchflugs durch kritische Böe**



# Zusammenfassung und Ausblick

- **Böenlastabminderung** bietet ein hohes **Potenzial zur Massereduktion** des Flugzeugs
- Es besteht der **projektübergreifende Bedarf** an geeigneten **GLA-Reglern zur Erfüllung projektspezifischer Anforderungen** im Bereich der Lastminderung
  - Wir haben einen/ein **generischen Prozess/Tool** zwecks **Entkopplung** der vordefinierten **Anforderungen, Optimierungsziele** und **Projektdaten** vom eigentlichen **Syntheseprozess** entwickelt
  - Das Tool ist **voll funktionsfähig, erfüllt unsere Anforderungen** und wird bereits zur Synthese von GLA-Reglern für vorhandene Flugzeugmodelle eingesetzt
- DLRK 2020 – Paper ist bald verfügbar
- **Weitere** (detailliertere) **Veröffentlichungen** bzgl. Softwaretool und Reglerentwurfsverfahren **sind geplant**:
  - **Euro-GNC 2021, IFASD 2021...**
- *In-FlyTec / oLAF*: Einbindung in eine **multidisziplinäre Optimierungskette (MDO)** geplant
  - Verbesserung der Implementierbarkeit in institutsübergreifende Toolketten
    - Verbesserung der Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit mit anderen Softwarepaketen



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !**

# Fragen



# Funding

Most of the work shown here, i.e. beyond the European 5<sup>th</sup> RTD AWIATOR project shown as reference, has been funded within the framework of the European CleanSky Joint Technology Initiative – Smart Fixed Wing Aircraft (Grant Agreement Number CSJU-GAM-SFWA-2008-01) and is currently being pursued within the framework of the European CleanSky2 Joint Technology Initiative – Airframe (Grant Agreement Number CS2JU-AIR-GAM-2014-2015-01 Annex 1, Issue B04, October 2nd, 2015) being part of the Horizon 2020 research and innovation framework programme of the European Commission.

Part of this work was funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) and the Aviation Project Management Authority (PT-LF) within the scope of the LuFo V-2 compound project Con.Move and DLR's subproject NEKON (grant number 20A1505C).

The authors gratefully acknowledge the European Commission (EC) and the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) support.

