

Deutscher Ingenieurtag - DIT 2023 | Frankfurt-Höchst | 25. Mai 2023

# Digitaler Zwilling – Ein Weg zu mehr Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit kritischer Infrastrukturen

Sven Herold, Christoph Tamm, Rainer Nordmann  
Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF



1938–2023

85 Jahre – Sicher.  
Digital. Nachhaltig.

---

# Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

# Fraunhofer LBF

## Zahlen und Fakten 2022

70 Mitarbeit in internationalen  
Fachausschüssen und Gremien

362 Mitarbeitende

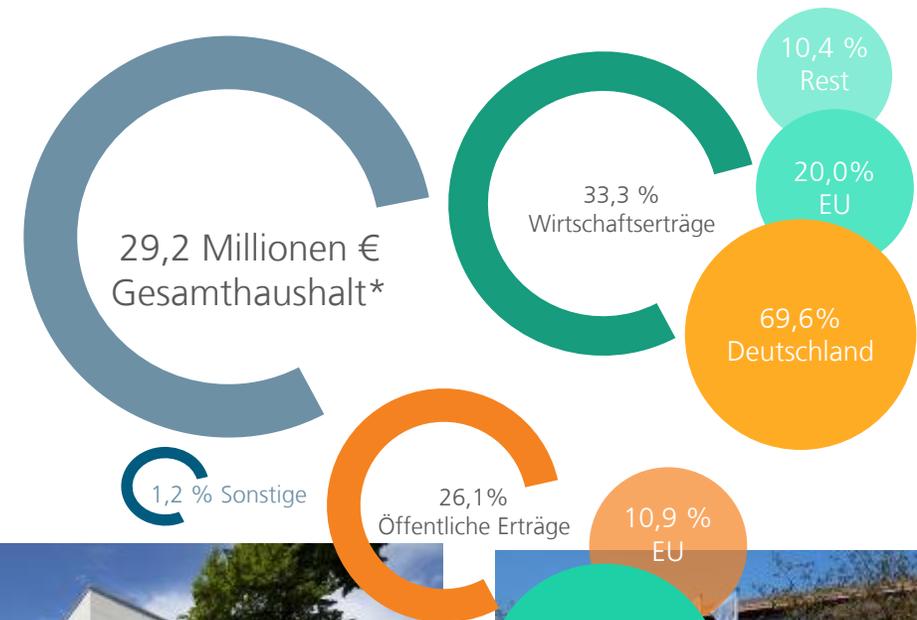
50 Vorlesungen

27 Mitarbeitende an  
der TU Darmstadt

108 Wissenschaftliche  
Veröffentlichungen

8 Neue Patente

51 Akademische Abschlüsse  
(Promotionen, Masterarbeiten)





In der **Adaptronik** entwickeln wir smarte Strukturtechnologien, um schwingungstechnische Probleme zu bewerten, zu beherrschen und Produkte performanter, leichter und sicherer zu machen.«



1938–2023

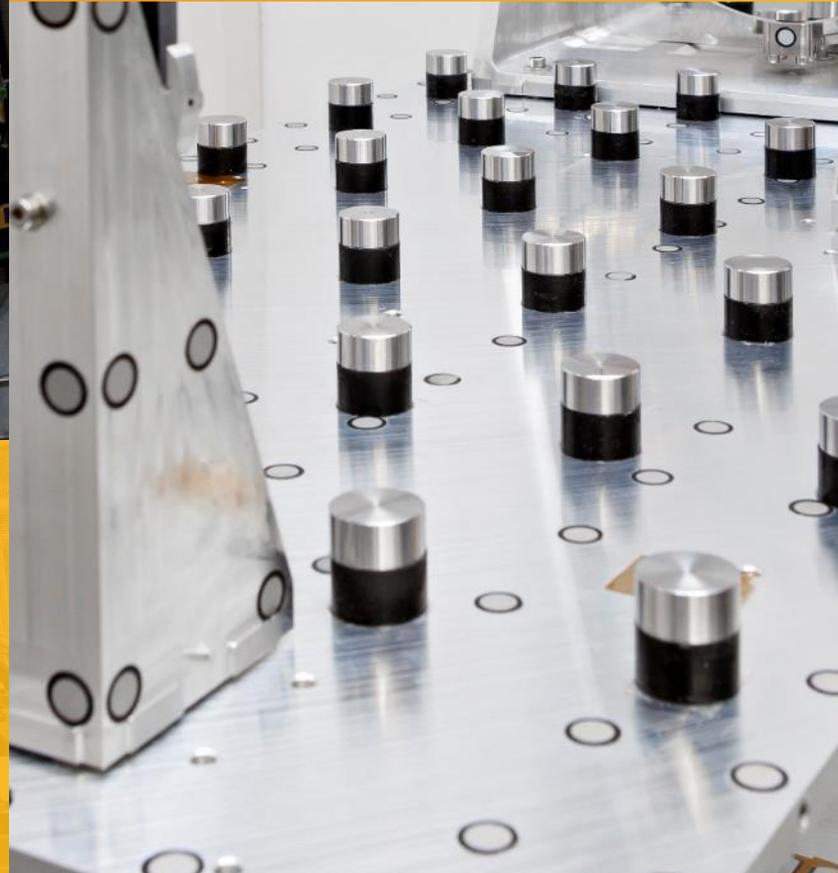
85 Jahre – Sicher.  
Digital. Nachhaltig.



Mit spezifischen Additivlösungen als Schlüssel für **polymertechnische Innovationen** gestalten wir nachhaltige Hochleistungswerkstoffe für technische Produktlösungen.«



**Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit** sind für uns Verpflichtung, auch komplexe maschinenbauliche Produkte für Ihren Einsatz in allen relevanten Eigenschaften optimal und von Beginn an zu gestalten.«



# **Digitaler Zwilling** – Ein Weg zu mehr Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit kritischer Infrastrukturen

## Outline

### **Motivation und Einleitung**

**Digitaler Zwilling** (Definition und Anwendungsmöglichkeiten)

**Betrieb kritischer Infrastrukturen → Beispiel Antriebsstrang im Kraftwerk**

**Modelle für die Vorhersage von Biege- und Torsionsschwingungen**

**Ableitung und Anpassung des Digitalen Zwillings für den/im Betrieb**

**On- und Off-line Simulation** (Überwachung, Identifikation, Lebensdauerschätzung, schwingungsreduzierende Maßnahmen)

**Zusammenfassung und Ausblick**



# Einleitung

Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit kritischer Infrastrukturen

## Beispiel der Energie-Infrastruktur

**Stabile Energieversorgung** ist wichtig für Industrie, Privathaushalte, Kommunikation, Mobilität, ...

Hohe Verfügbarkeit und Robustheit der Energieversorgung unterstützt reibungslosen Betrieb auch **in Krisensituationen**.

### Jedoch ...

- weniger leistungsfähige Systeme zur Sicherung von Grund- und Mittellast verfügbar
- alternative Energiequellen abhängig von Umweltbedingungen (örtlich und zeitlich) und meist nicht flexibel
- stark unterschiedlicher Energiebedarf (örtlich und zeitlich) → Nord-Süd-Gefälle



# Motivation

Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit kritischer Infrastrukturen

## Beispiel der Energie-Infrastruktur

### Erfordert ...

- Sicherstellung einer stabilen Energieerzeugung
- Stabiles Netz für robusten Energietransport und -verteilung
- Ausgleich des schwankenden Energiebedarfs durch potente Speicher mit ausreichender Kapazität
- Hohe Verfügbarkeit und Robustheit aller Komponenten, insbesondere der verbliebenen leistungsfähigen Systeme



## Digitaler Zwilling

Möglichkeit zur Steigerung von  
Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit



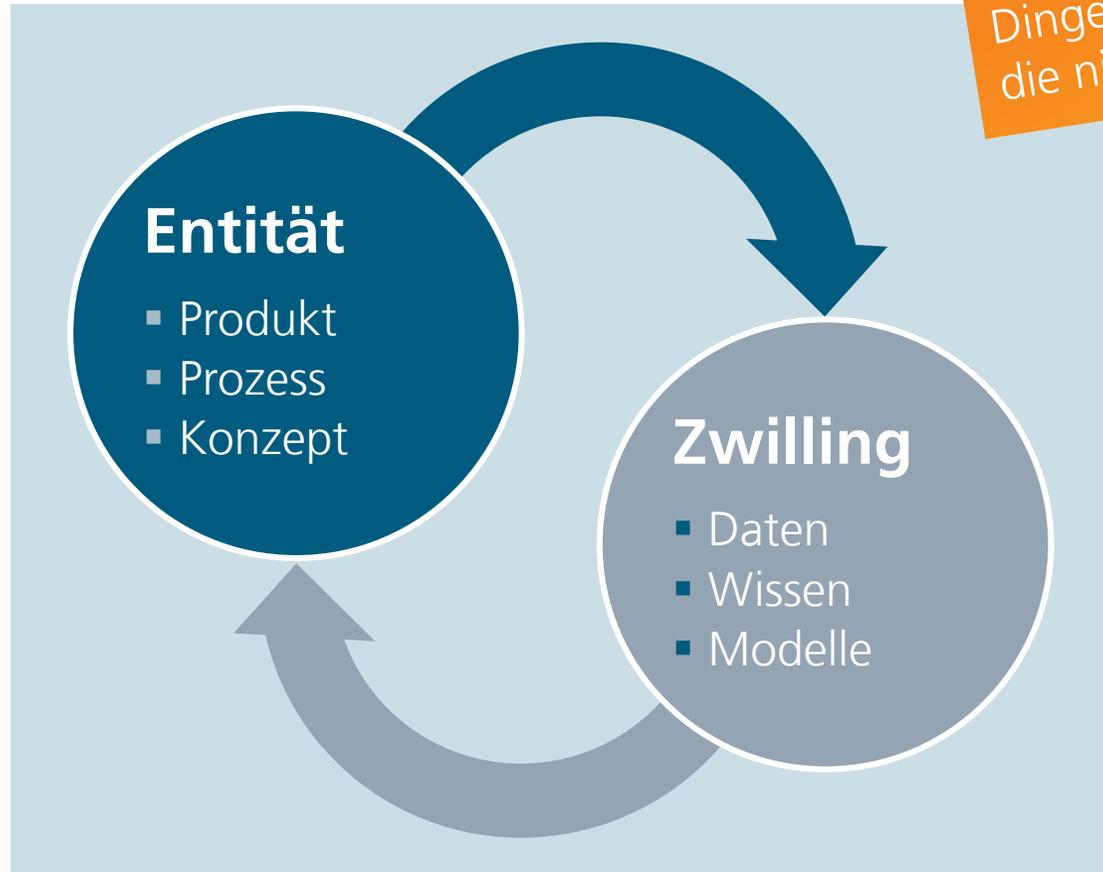
# Digitaler Zwilling



1938–2023

85 Jahre – Sicher.  
Digital. Nachhaltig.

**Idee:**  
Dinge messen und bewerten,  
die nicht direkt zugänglich sind.



## Definition NASA, 2010:

Integrated [...] simulation of a vehicle or system that uses [...] models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its flying twin.

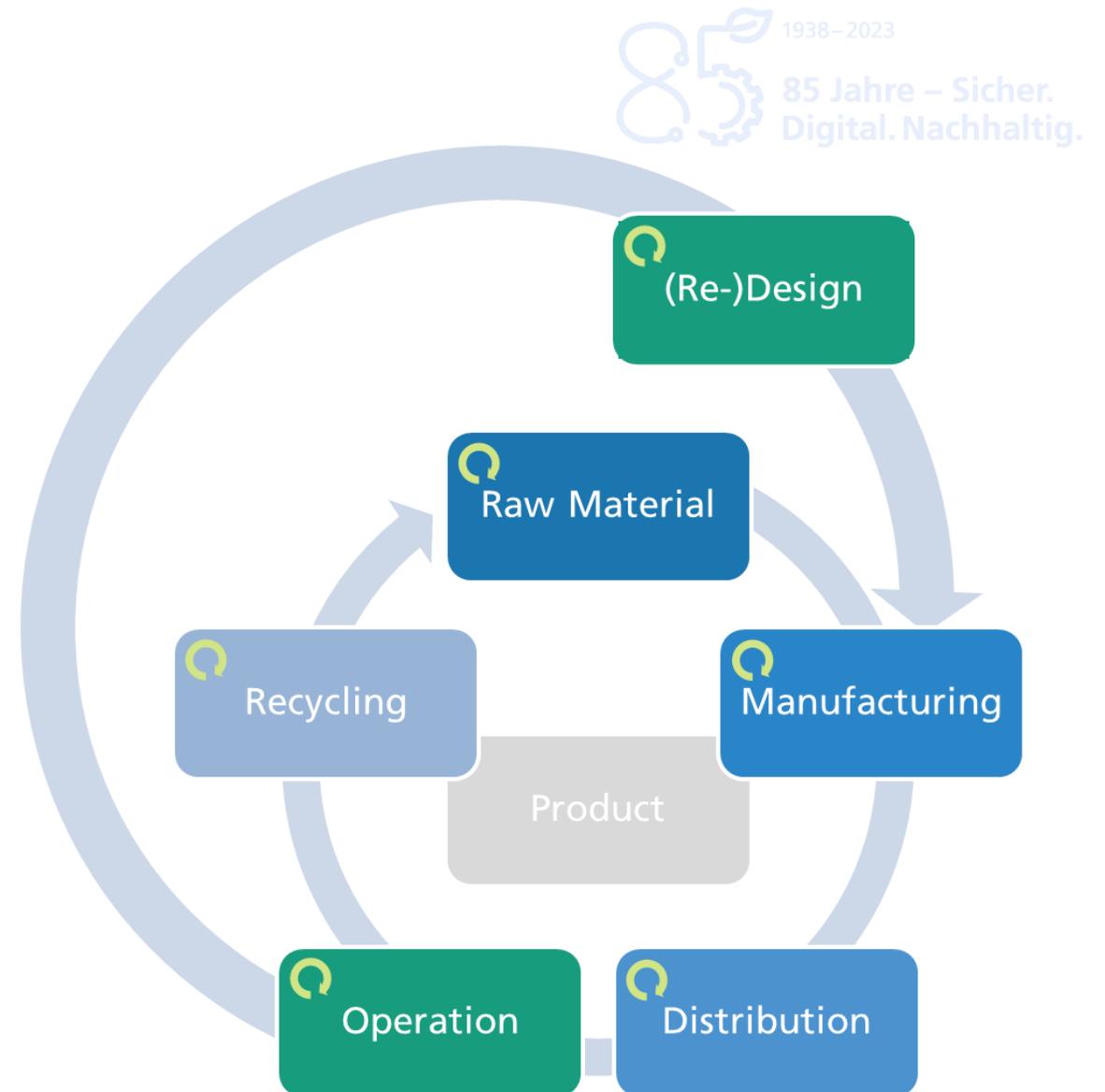
## Heute üblich:

*Digitale Repräsentation* des Wissens über den Zustand und das Verhalten von Objekten oder Konzepten *der realen Welt*

# Digitaler Zwilling

## Anwendungen im Produktlebenszyklus

- **Entwicklung:** Virtueller Prototyp, modellbasierte Analyse, Bewertung und Optimierung
- **Ausgangsmaterialien:** Dokumentation und Rückverfolgung der Herkunft
- **Produktion:** Prozessüberwachung und Qualitätssicherung
- **Distribution:** Verkaufsstrategie, Sendungsverfolgung
- **Betrieb/Nutzung:** **Datenerfassung, Überwachung, Betriebsoptimierung, Prädiktive Wartung, ...**
- **EoL/Recycling:** Nachverfolgung und Wiederverwertung von Teilen und Material
- **Re-Design:** Bedarfsgerechte und nutzungsbasierte Designoptimierung

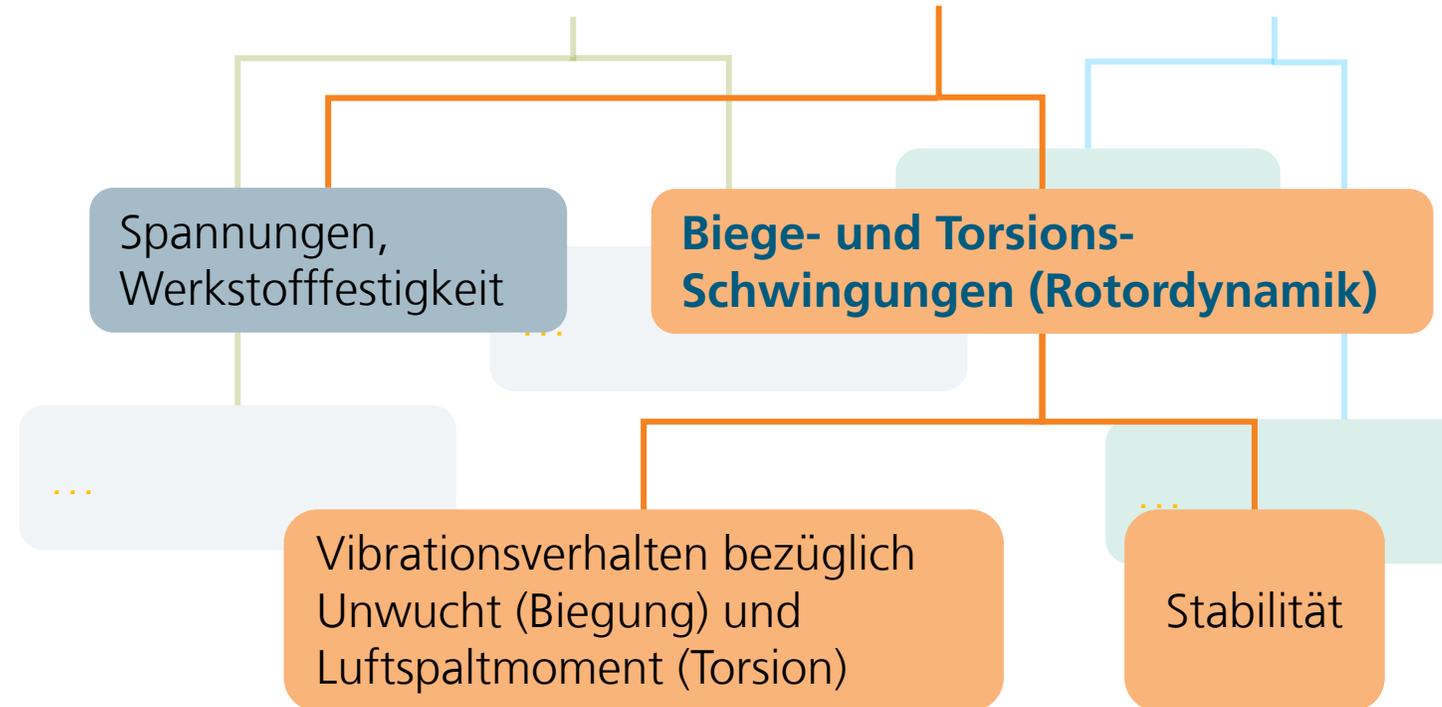




# Anwendung: **Antriebsstrang von Kraftwerken**

Mechanik und andere physikalische Disziplinen

Disziplinen: **Thermodynamik** **Mechanik** **Elektrodynamik**



Quelle: © gui yong nian - stock.adobe.com

# Modelle zur Vorhersage von Schwingungen

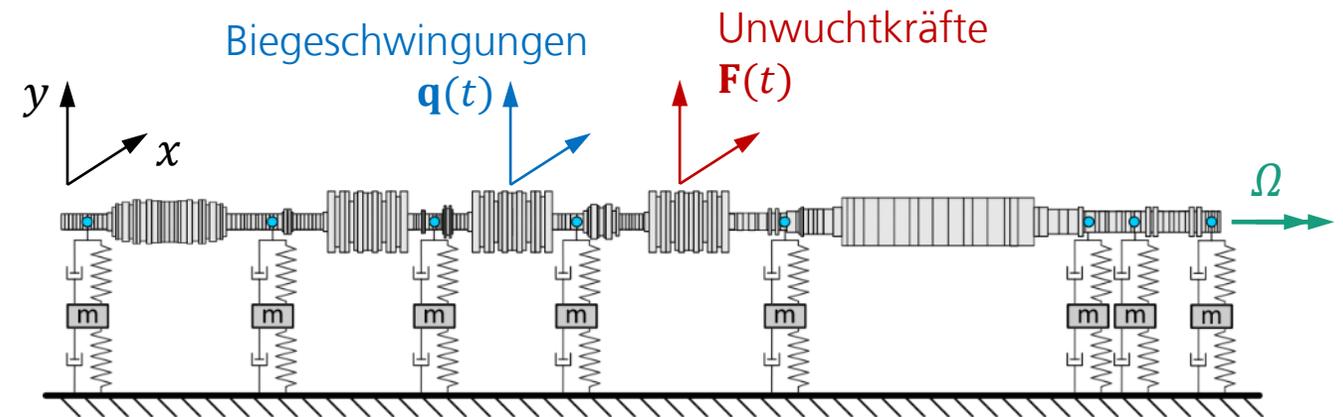
## Biegeschwingungen: Mechanisches Modell und Bewegungsgleichungen

Die Matrizen der Bewegungsgleichung  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}(\Omega)$  und  $\mathbf{K}(\Omega)$  für Biegeschwingungen sind charakterisiert durch

- Steifigkeit, Masse und Dämpfung des Antriebsstrangs
- Hydrodynamische Gleitlager
- Mechanische Admittanz des Maschinenfundaments

$\mathbf{K}$  und  $\mathbf{D}$  sind aufgrund gyroskopischer Effekte und der Gleitlager abhängig von der Drehzahl  $\Omega$ .

Die Hauptanregung sind **Unwuchtkräfte  $\mathbf{F}(t)$** .



$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t)$$

# Modelle zur Vorhersage von Schwingungen

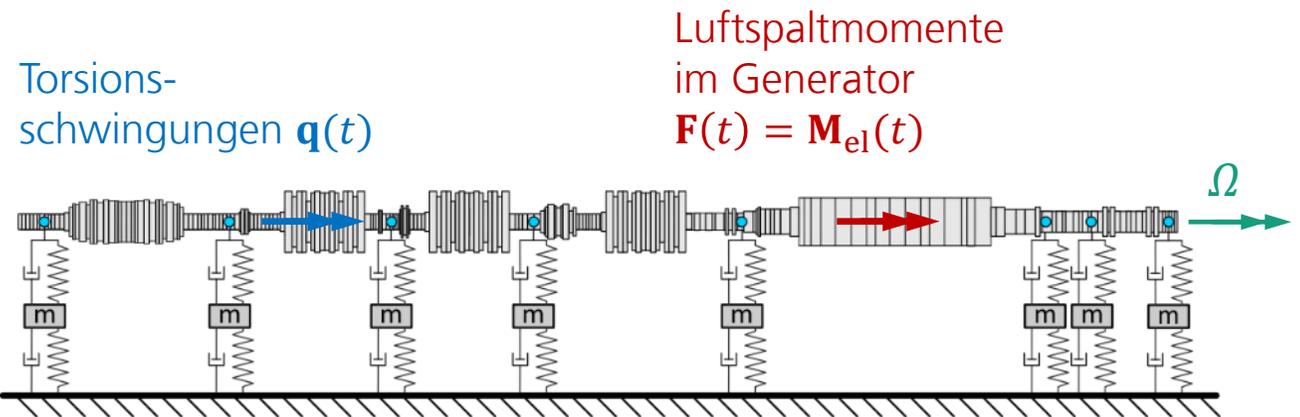
## Torsionsschwingungen: Mechanisches Modell und Bewegungsgleichungen

Die Matrizen der Bewegungsgleichung  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$  und  $\mathbf{K}(\Omega)$  für Torsionsschwingungen sind charakterisiert durch

- Steifigkeit, Masse und Dämpfung des Antriebsstrangs

$\mathbf{K}$  ist aufgrund der Zentrifugalkräfte an den Schaufeln abhängig von der Drehzahl  $\Omega$  und  $\mathbf{D}$  (Dämpfung) üblicherweise sehr klein.

Die Hauptanregung sind **Luftspalmmomente**  $\mathbf{M}_{el}(t)$ , hervorgerufen durch elektro-mechanische Kopplung (Generator, Netz, Verbraucher, Quellen).



$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t)$$

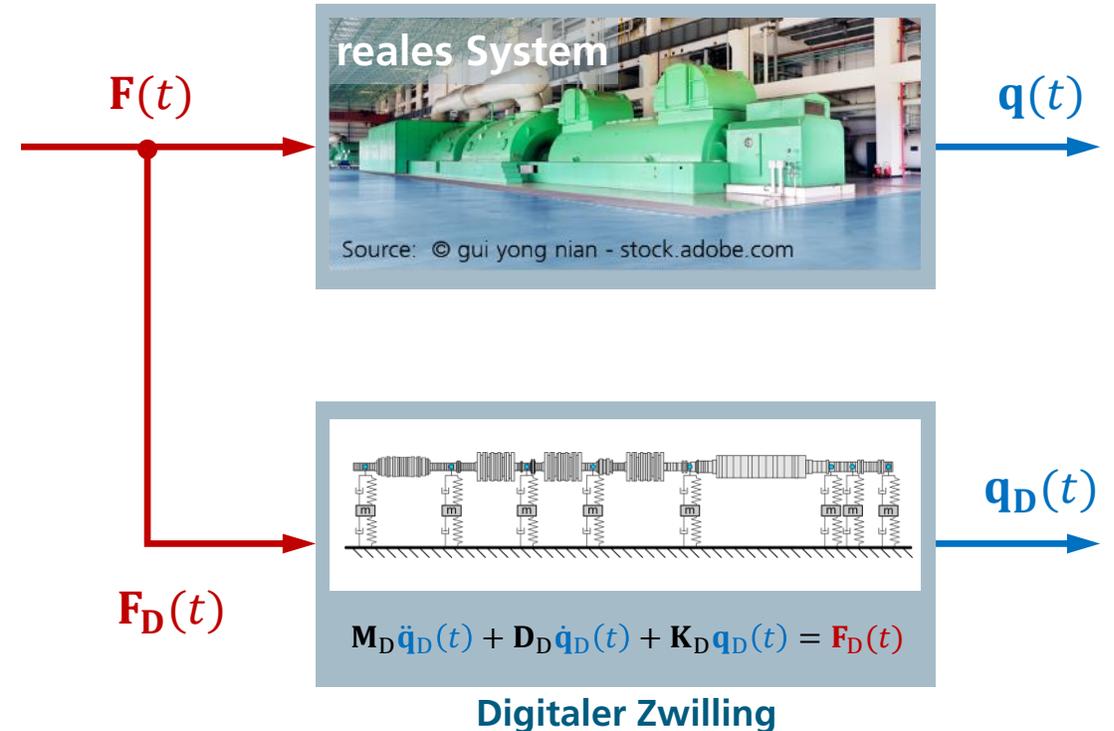
# Digitaler Zwilling

... auf der Grundlage numerischer Modelle

Ein numerisches Modell, z.B. ein Finite-Elemente Modell kann als **Digitaler Zwilling** im Betrieb genutzt werden. Das Verhalten des realen Systems kann jedoch durch Modelle nur approximiert werden.

Um die Differenzen zwischen realem und virtuellem System zu reduzieren, müssen sogenannte **Observer** (Beobachter) oder Regelungen eingesetzt werden, um den **Digitalen Zwilling** kontinuierlich zu aktualisieren.

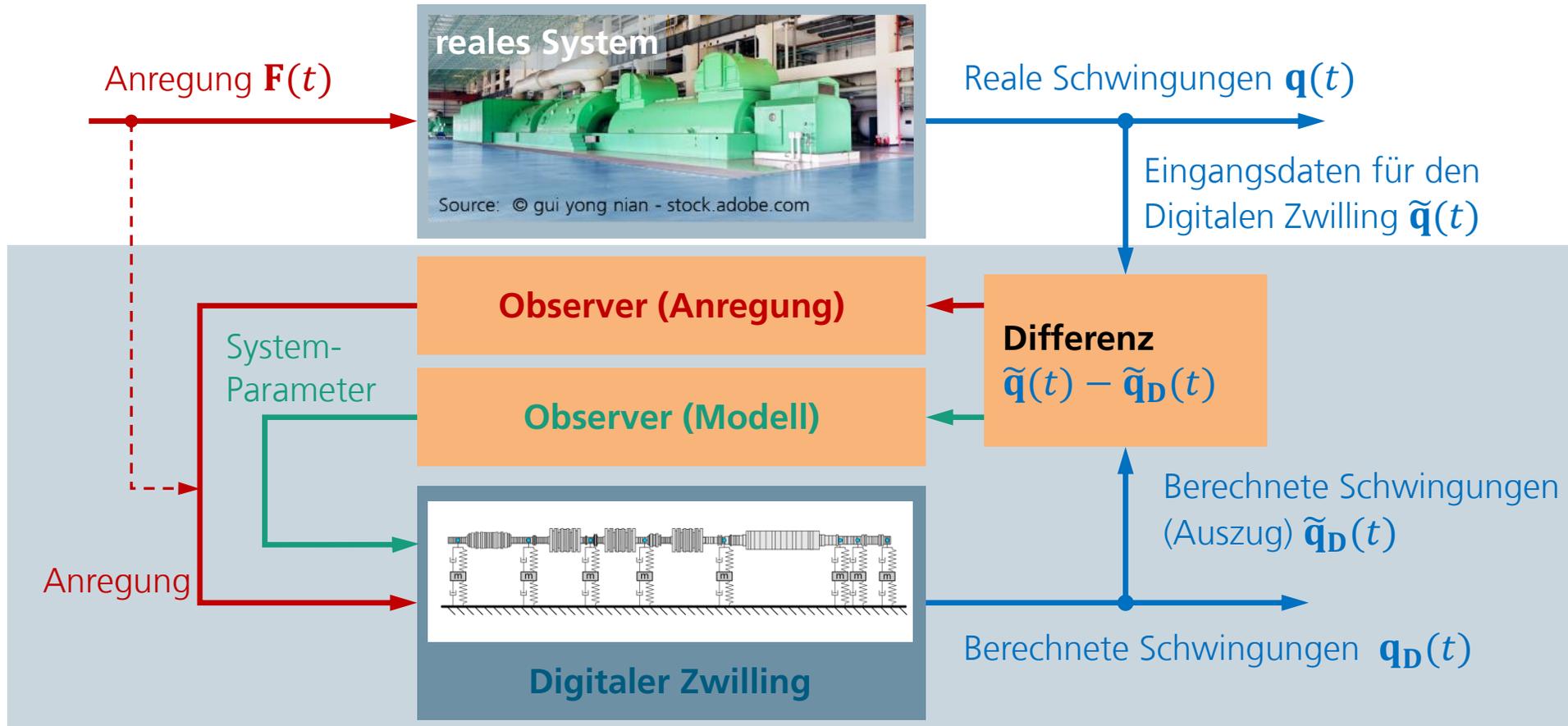
Als Eingang eines **Observers** dienen die Differenzen zwischen gemessenen  $\mathbf{q}(t)$  und berechneten Schwingungen  $\mathbf{q}_D(t)$ .



# Digitaler Zwilling

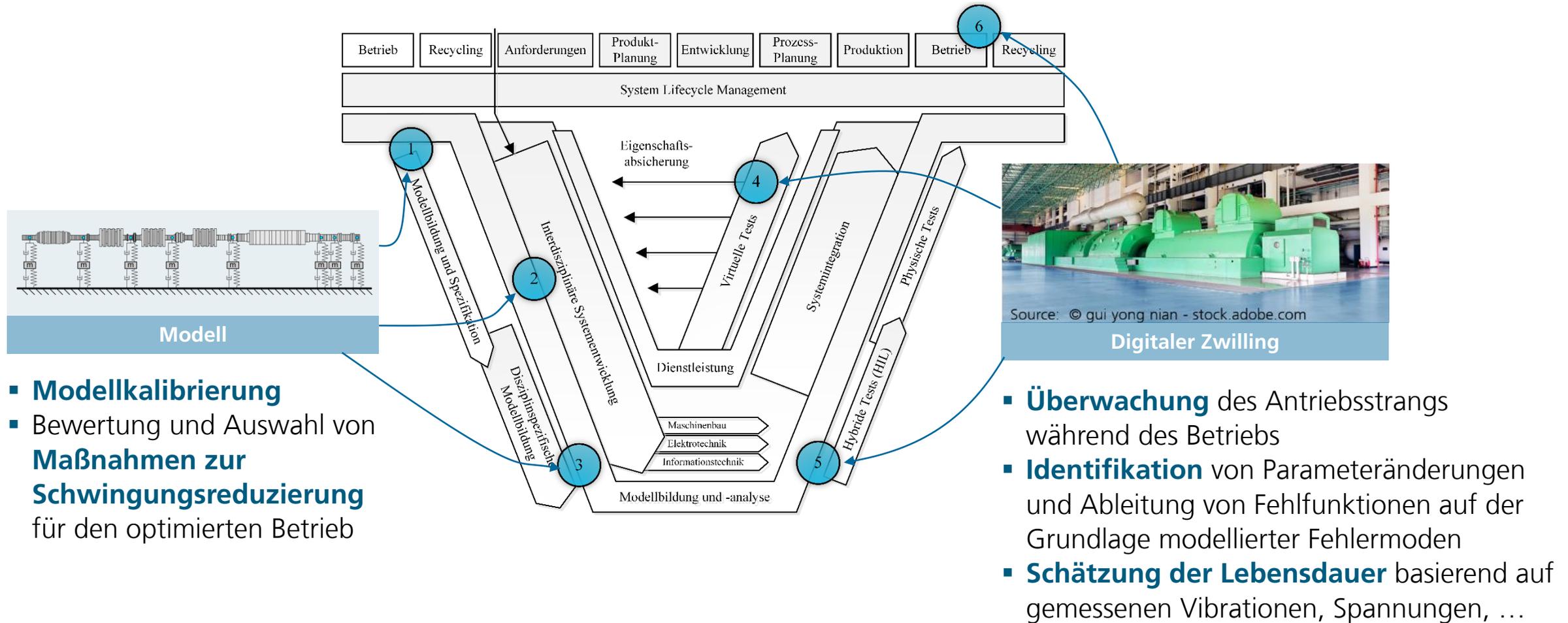
## Schematischer Aufbau

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{F} = \mathbf{q}$$



# Digitaler Zwilling

## Einordnung in das V-Modell der modellbasierten Systementwicklung



# Digitaler Zwilling – Ein Weg zu mehr Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit kritischer Infrastrukturen

## Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

- Parallel zum realen System kann ein **Digitaler Zwilling** wertvolle **Zusatzinformationen über den Betrieb** von Systemen liefern.
- **Digitale Zwillinge** können helfen **kritische Systemzustände** zu erkennen und frühzeitig **Maßnahmen** zu planen.
- **Zuverlässigkeit, Resilienz und Verfügbarkeit** kritischer Infrastrukturen können durch Digitale Zwillinge **verbessert** werden.

### Ausblick

- Erst ein systemischer **Digitaler Zwilling** der gesamten **Energieinfrastruktur** (Erzeugung, Transport, Speicher, Verbraucher) kann die **Resilienz der Energieversorgung** nachhaltig unterstützen.



