

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

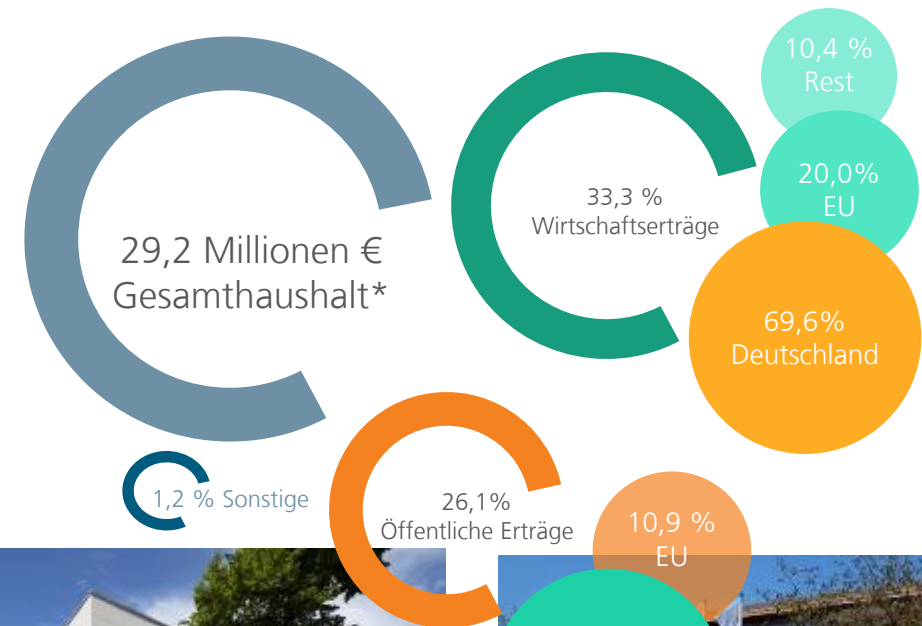
50 Vorlesungen

27 Mitarbeitende an
der TU Darmstadt

108 Wissenschaftliche
Veröffentlichungen

8 Neue Patente

51 Akademische Abschlüsse
(Promotionen, Masterarbeiten)



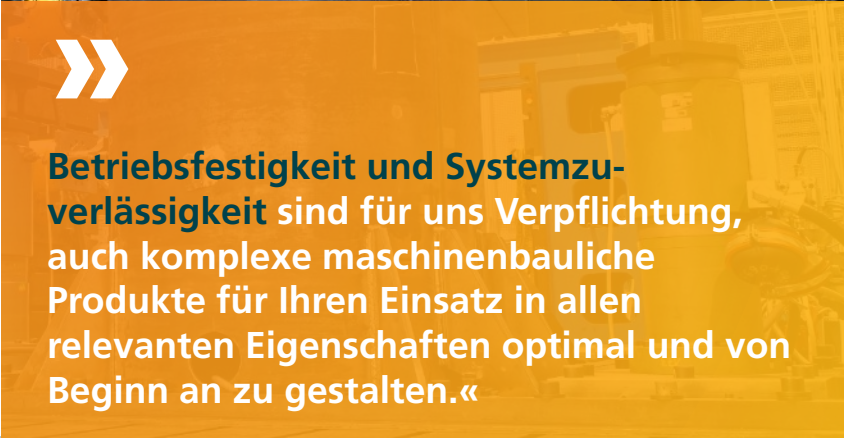


In der **Adaptronik** entwickeln wir smarte Strukturtechnologien, um schwingungstechnische Probleme zu bewerten, zu beherrschen und Produkte performanter, leichter und sicherer zu machen.«

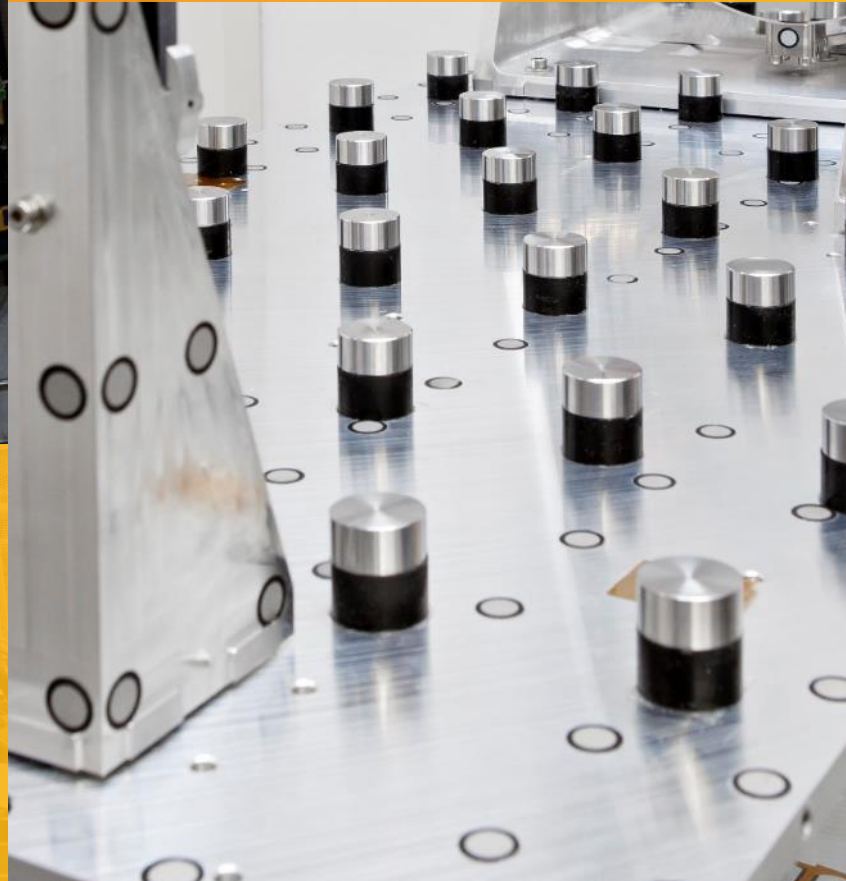


1938–2023

85 Jahre – Sicher.
Digital. Nachhaltig.



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.«



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



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



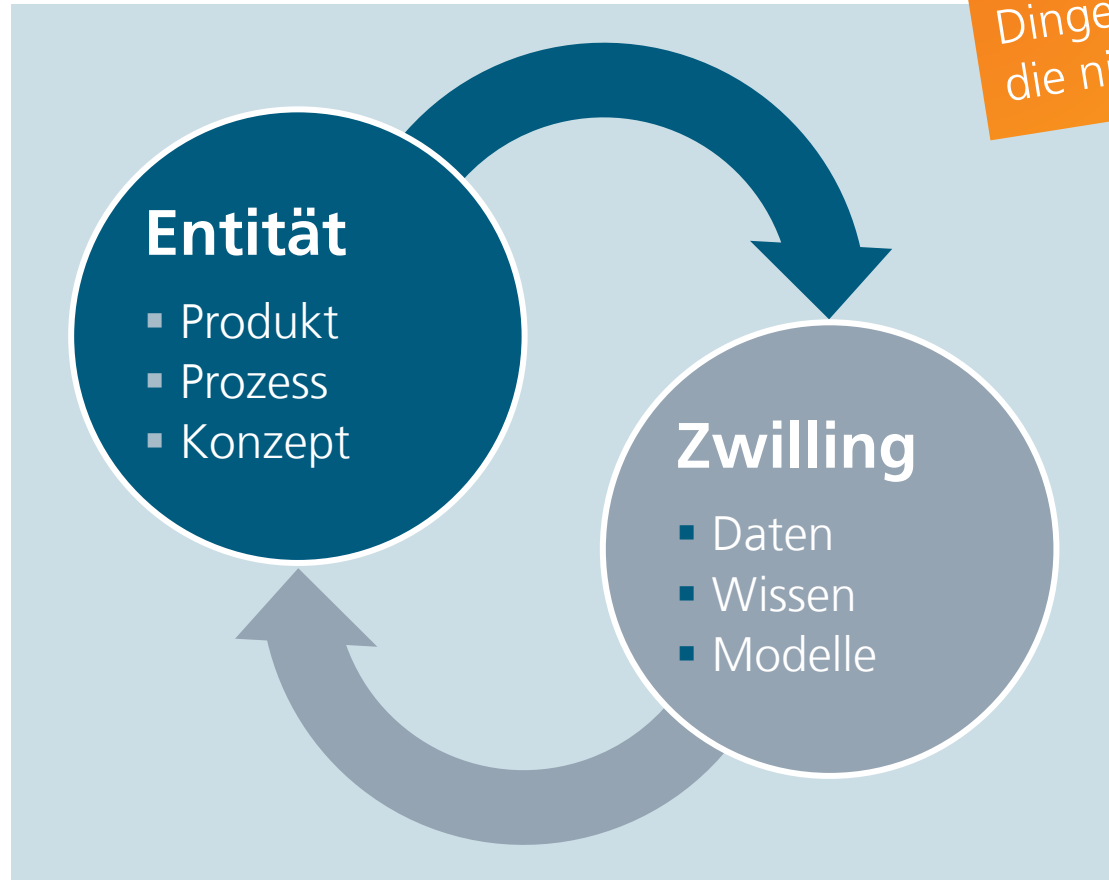
Digitaler Zwilling



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.

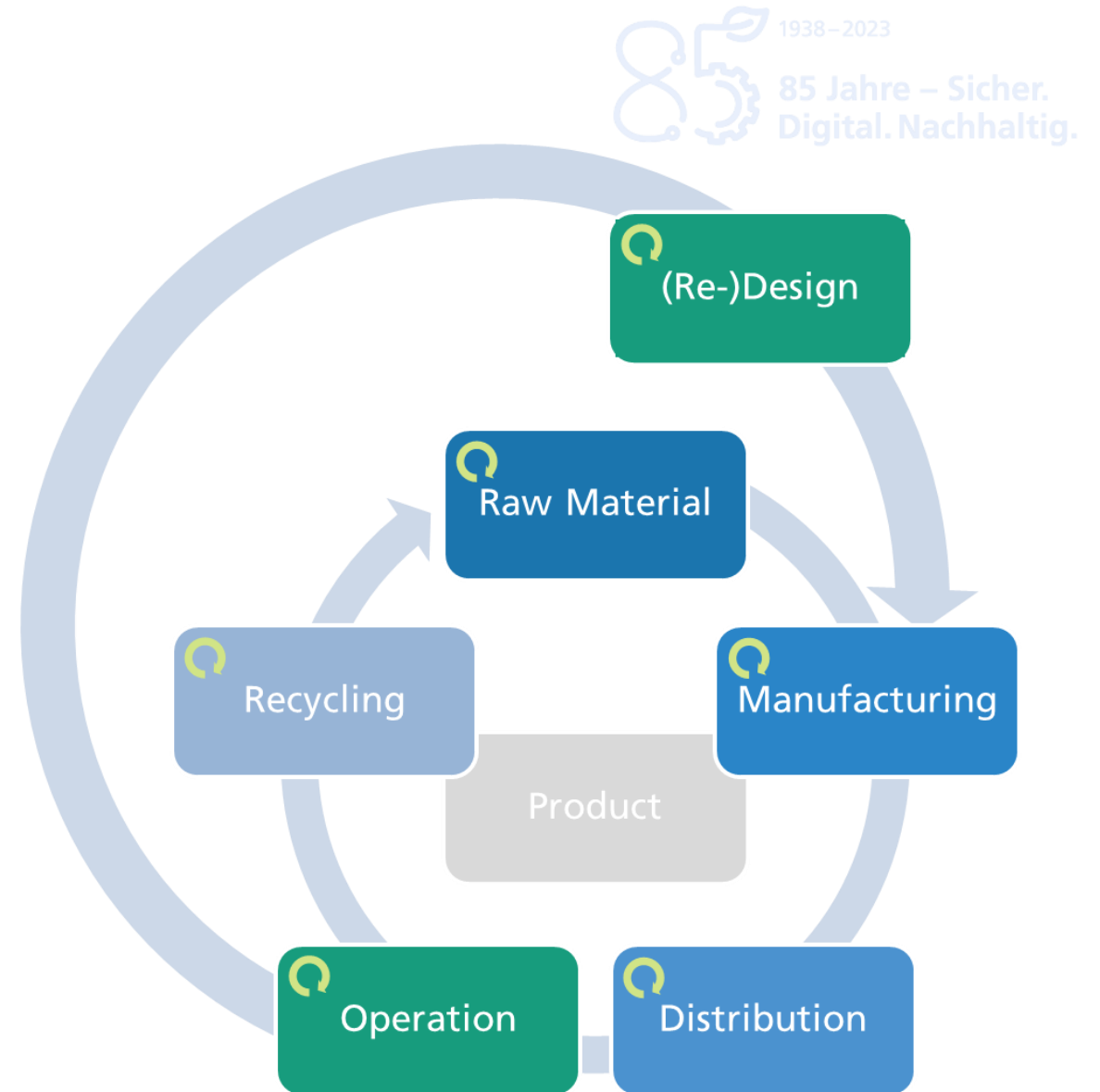
Heute üblich:

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

Digitaler Zwilling

Anwendungen im Produktlebenszyklus

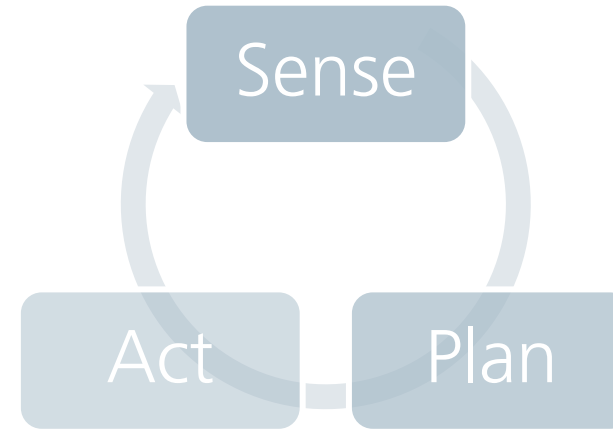
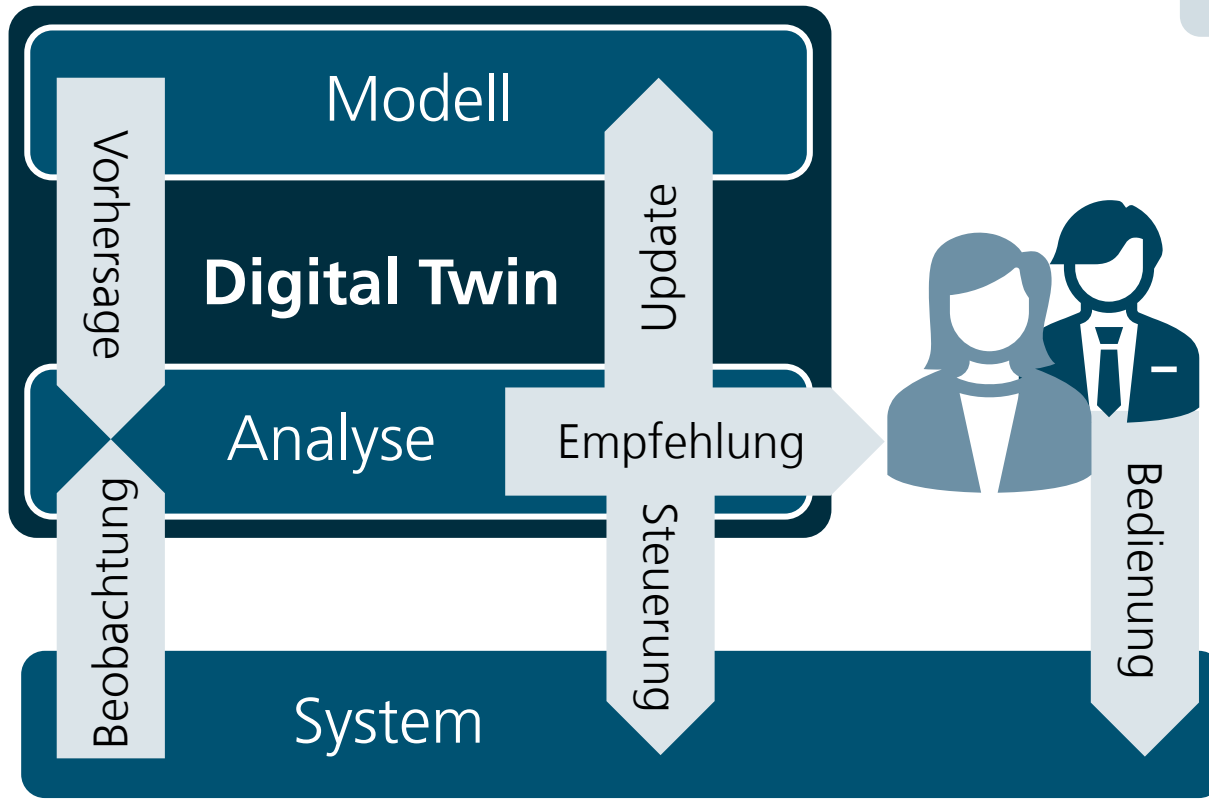
- **Entwicklung:** Virtueller Prototyp, modellbasierte Analyse, Bewertung und Optimierung
- **Ausgangsmaterialien:** Dokumentation und Rückverfolgung der Herkunft
- **Produktion:** Prozessüberwachung und Qualitätssicherung
- **Distribution:** Verkaufsstrategie, Sendungsverfolgung
- **Betrieb/Nutzung:**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



Digitaler Zwilling

im Betrieb kritischer Systeme

Kritisches System:



Beobachtung: Digitaler Zwilling aggregiert Betriebszustände und Sensordaten aus dem System.

Modellbasierte Vorhersage von Systemzustand und erwartetem Systemverhalten.

Basierend auf dem Vergleich von Vorhersage und Beobachtung:

- **Identifikation** des Systemzustands, Update des Verhaltensmodells.
- Innerhalb des definierten Regelkorridors **aktive Steuerung**.
- Aufbereitung von Systeminformation und ggf. **Empfehlung** für Eingriff an Bedienpersonal/Experten.

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

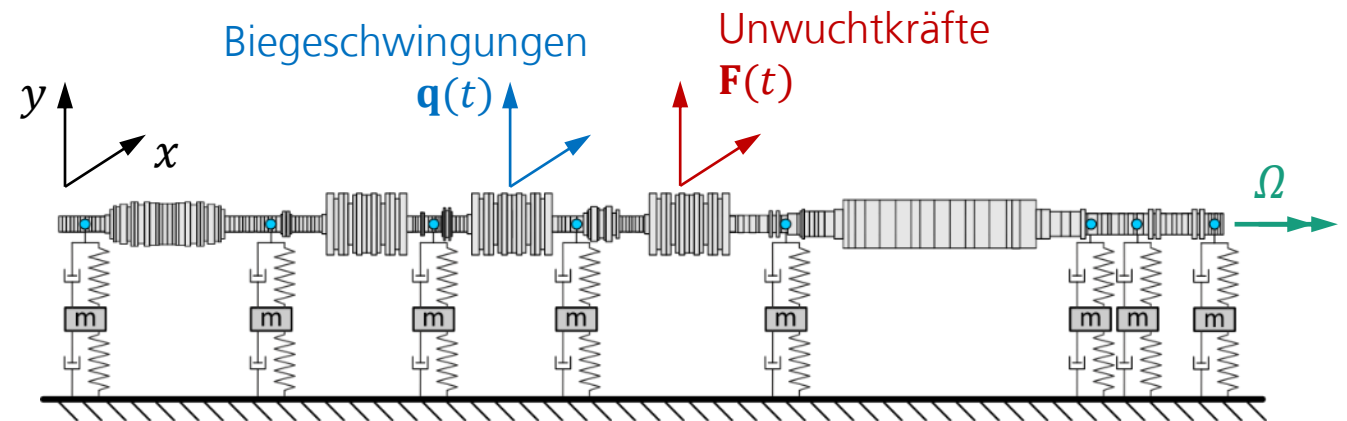
Biegeschwingungen: Mechanisches Modell und Bewegungsgleichungen

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 Ω .

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

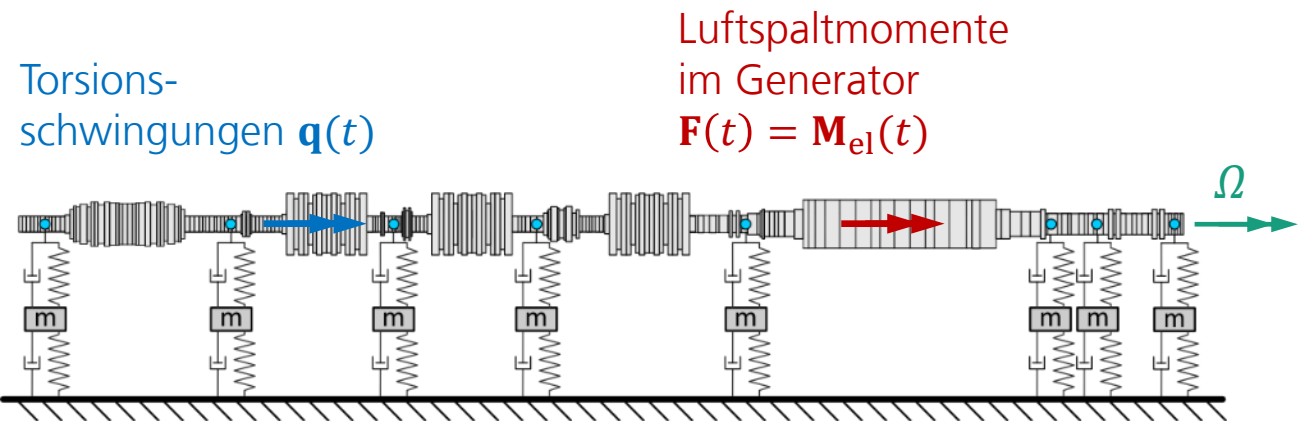
Torsionsschwingungen: Mechanisches Modell und Bewegungsgleichungen

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 Ω und \mathbf{D} (Dämpfung) üblicherweise sehr klein.

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



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

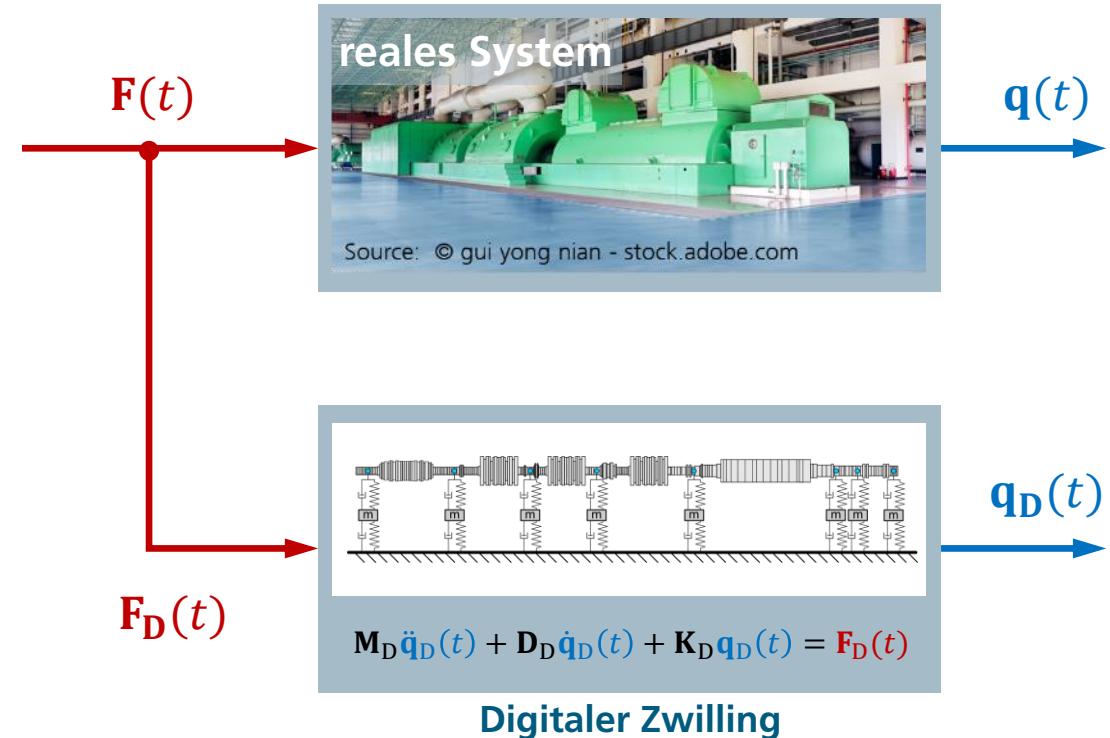
Digitaler Zwilling

... 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.

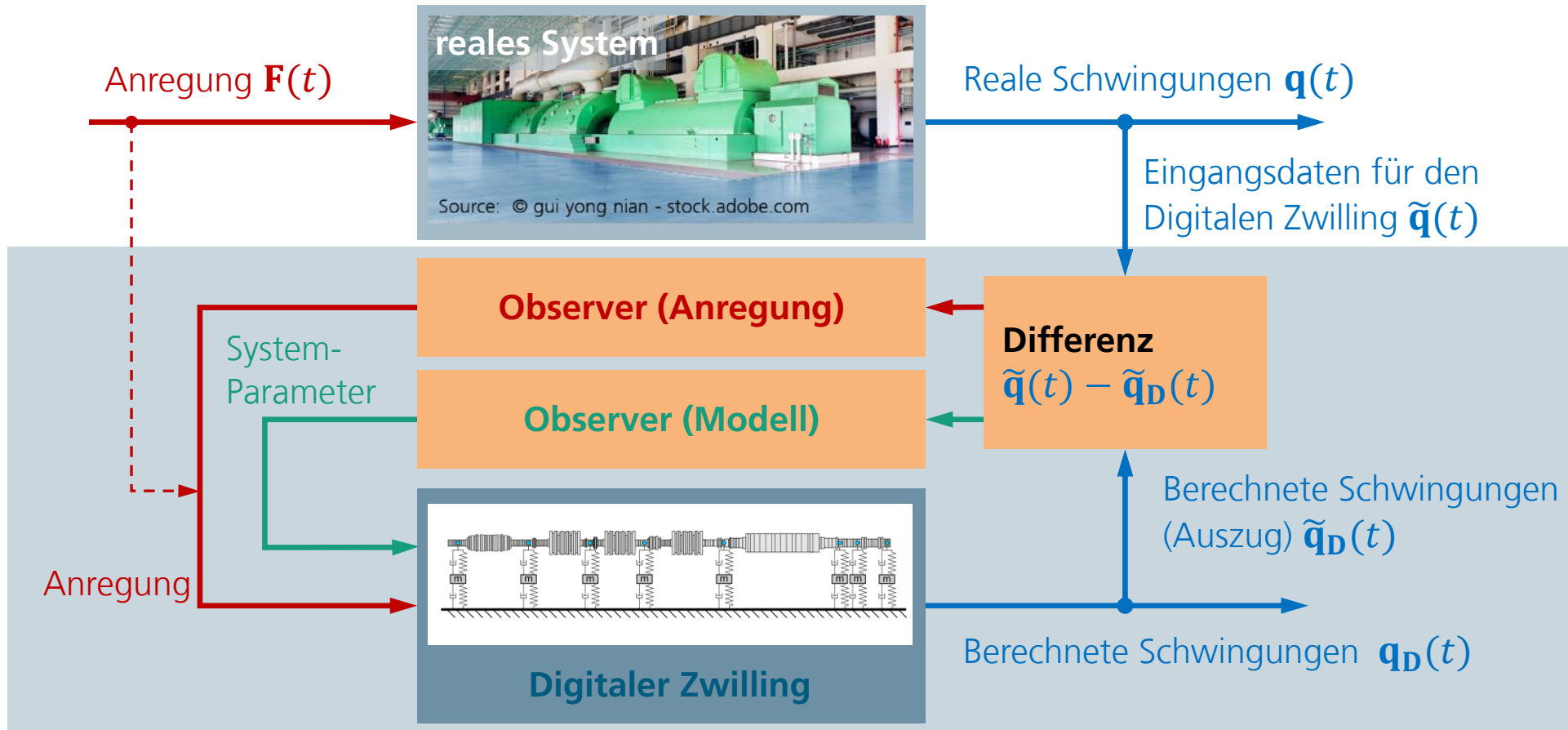
Als Eingang eines **Observers** dienen die Differenzen zwischen gemessenen $q(t)$ und berechneten Schwingungen $q_D(t)$.



Digitaler Zwilling

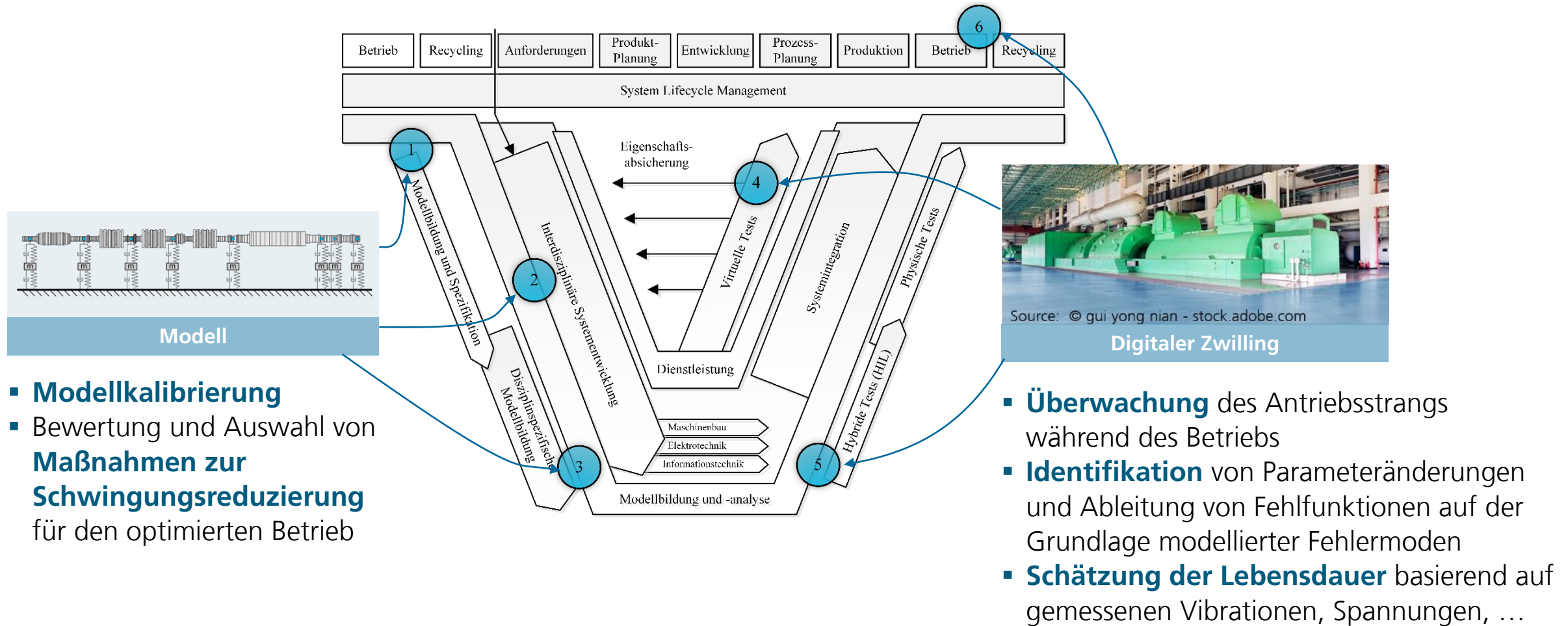
Schematischer Aufbau

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



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.



