

**Universität Stuttgart**

Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



# Herausforderungen in der Entwicklung Digitaler Zwillinge

SECPPS Workshop

Traunkirchen, 01.06.22



**Jun.-Prof.  
Dr. rer. nat.  
habil.  
Andreas  
Wortmann**

# Über den Sprecher

Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann

- Jun.-Prof. für **modellgetriebene Softwareentwicklung** am ISW
- **Habilitation** in der Informatik der RWTH Aachen
- **Deputy Coordinator** im Internet of Production Excellenzcluster
- Akad. **Oberrat** am Lehrstuhl für Software Engineering
- Promotion im Software Engineering
- **Forschungsinteressen**
  - Modellgetriebene Software
  - Softwaresprachen
  - 100+ Publikationen (h: 23, i10: 48)
  - 6 Vorlesungen, 12 Seminare/Praktika, 60+ Abschlussarbeiten
  - Softwarearchitekturen
  - Anwendung: CPS, IoT, I4.0

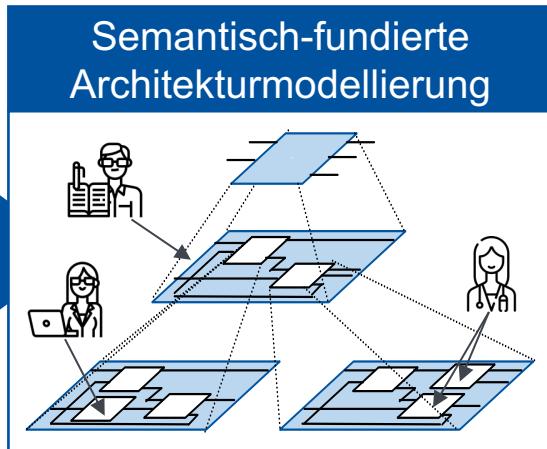


# Themenschwerpunkte

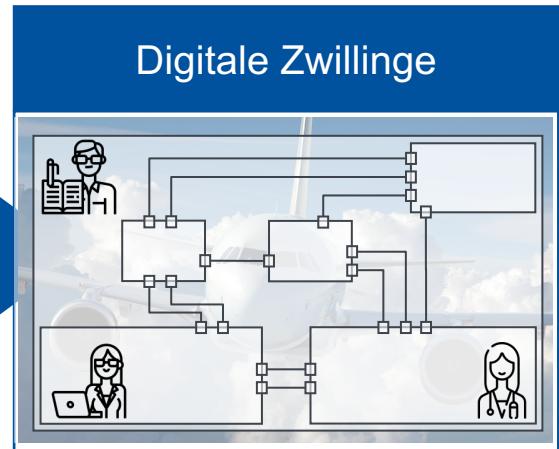
## Bessere Software durch Abstraktion und Automatisierung



- Effiziente Entwicklung präziser Software-Sprachen für Software- und Domänen-experten
- Komponentenbasierung
- Sprachproduktlinien



- Modellgetriebene Software-Architekturen
- Fundiert in Fokus-Theorie
- Semantische Automatisierung
- Erweiterbar mit präzisen Software-Sprachen

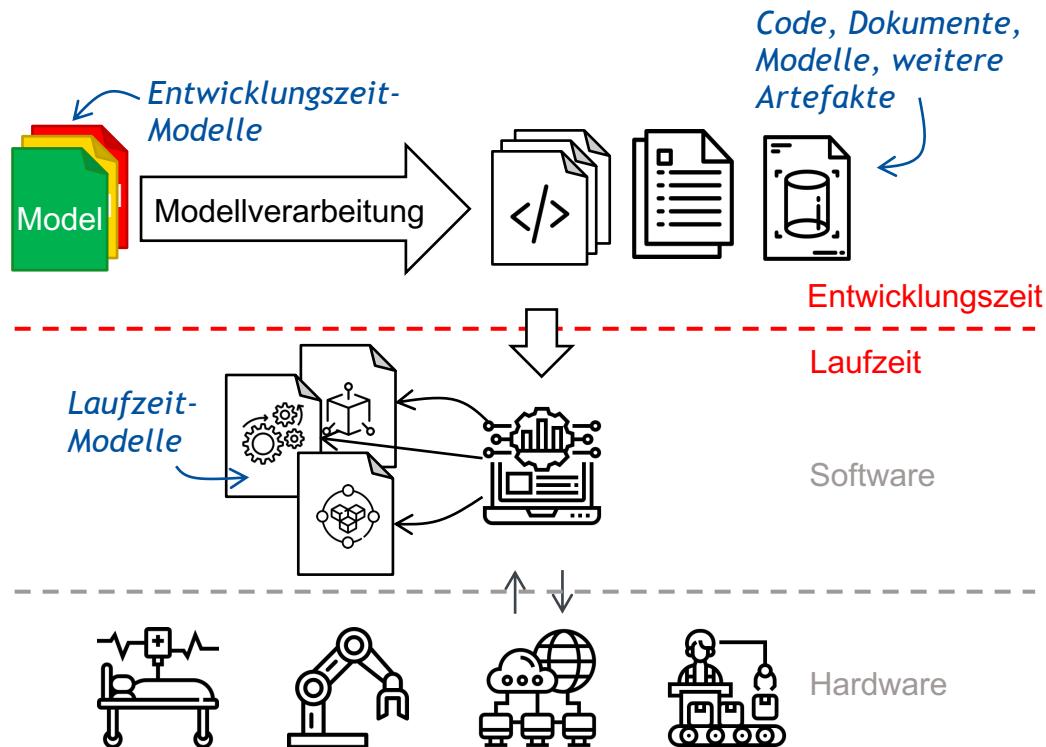


- Repräsentation, Verhaltens-optimierung, Prädiktion
- Basierend auf formalen Softwarearchitekturen
- Integration domänen-spezifischer Sprachen

# Modellgetriebene Softwareentwicklung (MDD)

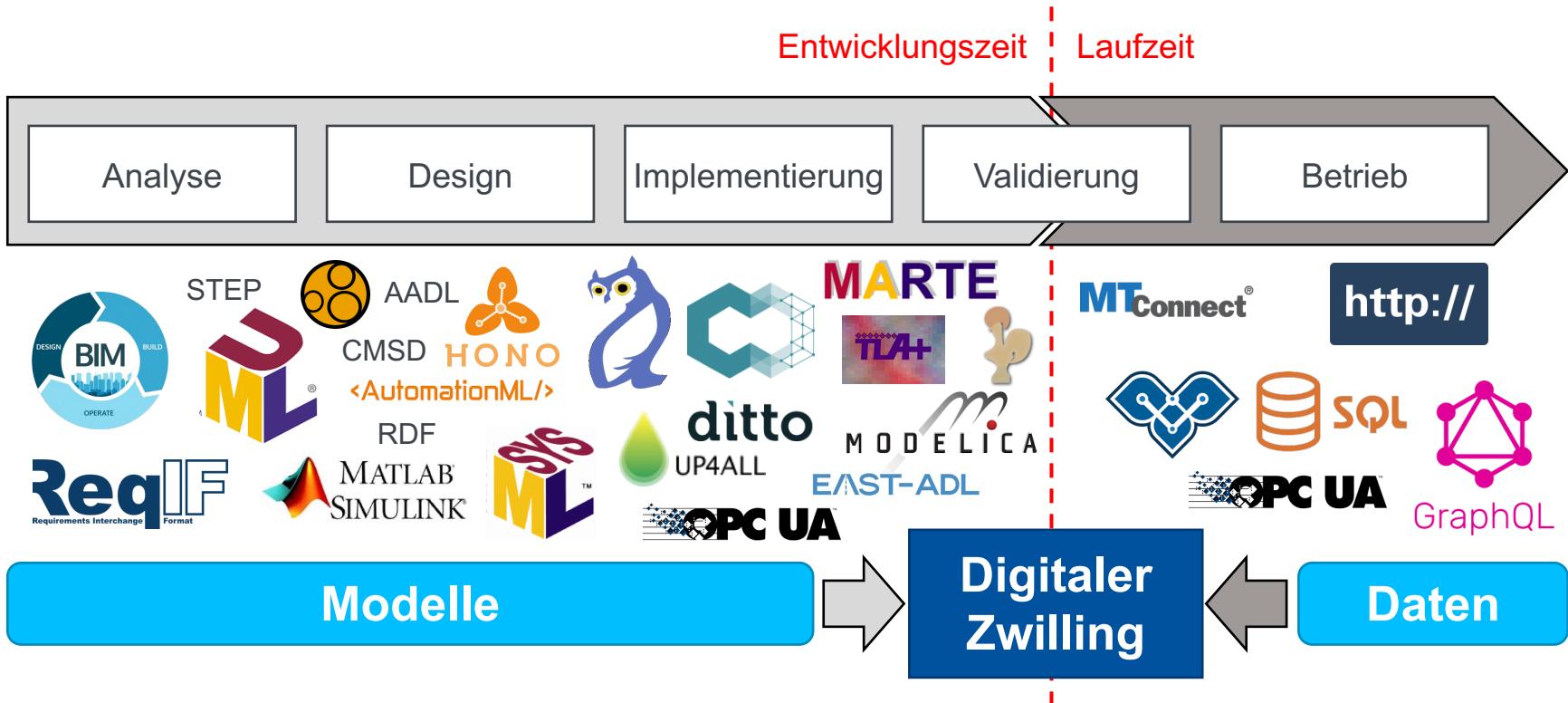
Modelle sind primäre Entwicklungsartefakte

- Modelle beschreiben **Sichten**
  - Anforderungen, Architektur, Verhalten, Datenstrukturen, Zusammenhänge, Deployment, Build-Pipelines, ...
- Modellverarbeitungswerzeuge
  - **Analysieren** Modelle: Wohlgeformtheit, Korrektheit, Vollständigkeit, ...
  - **Synthetisieren** Downstream-Artefakte: Code, Tests, Dokumentation, ...
- Automatische Verarbeitung von Modelle erfordert **explizite Software-Sprachen**



# Modellgetriebene Softwareentwicklung

## Typischer Entwicklungsprozess



# Eine einfache Wahrheit über Digitale Zwillinge

**Ein Digitaler Zwilling repräsentiert ein System.**

# Eine einfache Wahrheit über Digitale Zwillinge

Tatsächlich?

## Ein Digitaler Zwilling repräsentiert ein System.

Ist es immer genau  
einer pro System?

Digitalisierung impliziert  
Abstraktion: Wie viel darf  
abstrahiert werden?

Was bedeutet es ein  
Zwilling zu sein?

Was muss die  
Repräsentation leisten?

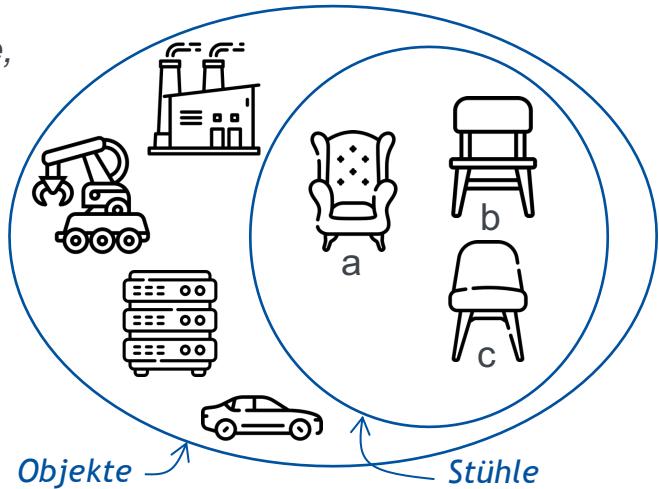
Welche Art von Systemen  
(techn./biolog.) sollen  
verzwilligt werden?

Ist es immer genau ein System?  
Gibt es digitale Zwillinge von  
System-of-Systems?

# Ernsthafte Diskussion über Digitale Zwillinge bedarf einer guten Definition

Gute Definitionen unterscheiden enthaltene und ausgeschlossene Konzepte

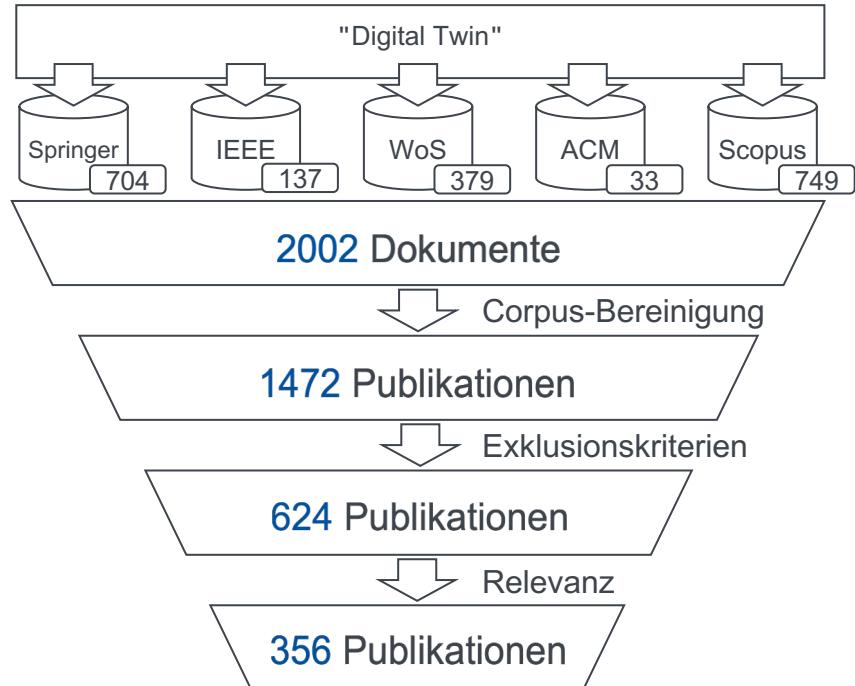
- **Intensionale Definition:** Notwendige Eigenschaften.
  - Beispiel: „*Ein Stuhl ist ein physisches Objekt das über Beine, und eine Lehne verfügt sich zum Sitzen für eine Person eignet und sich nicht selbstständig bewegt.*“
- **Extensionale Definition:** Enthaltene Objekte.
  - Beispiel: „*Stühle = {a,b,c}*“
  - Es bedarf einer intensionalen Definition Digitaler Zwillinge
  - Für Diskurs, Untersuchung, Theorienbildung, systematische Entwicklung, Anwendung, ...



# Die umfangreichste Literaturstudie über Digitale Zwillinge

## Forschungsfragen und Überblick

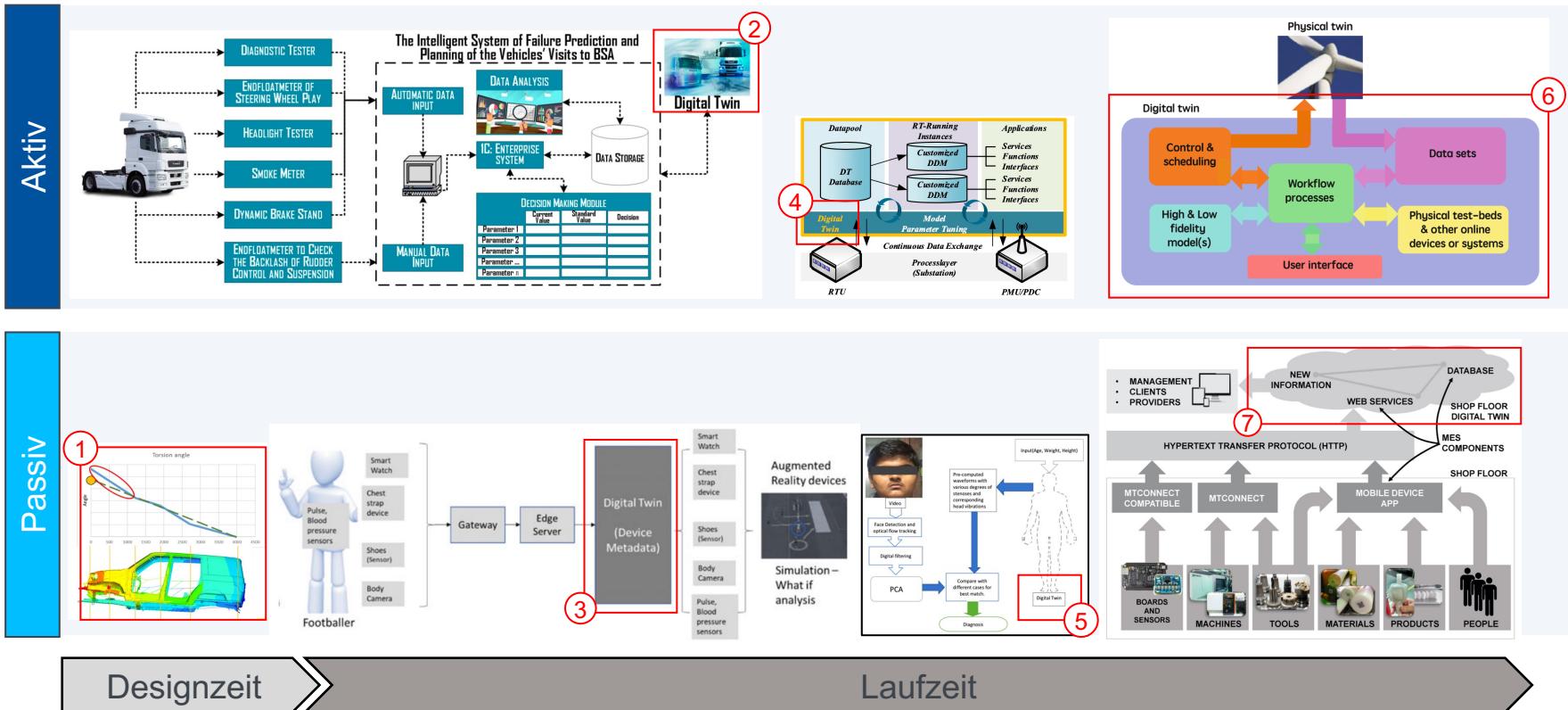
1. Wer nutzt Digitale Zwillinge **wofür**?
2. Welche **Eigenschaften** haben Digitale Zwillinge?
3. Wie werden Digital Zwillinge **entwickelt**?
4. Wie werden Digital Zwillinge **verteilt**?
5. Wie werden Digital Zwillinge **betrieben**?
6. Wie werden Digital Zwillinge **evaluiert**?



M. Dalibor, N. Jansen, D. Schmalzing, R. Rumpe, M. Wimmer, L. Wachtmeister, A. Wortmann. A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins.  
(Erscheint in Journal of Systems and Software; Preprint [www.wortmann.ac/preprints](http://www.wortmann.ac/preprints))

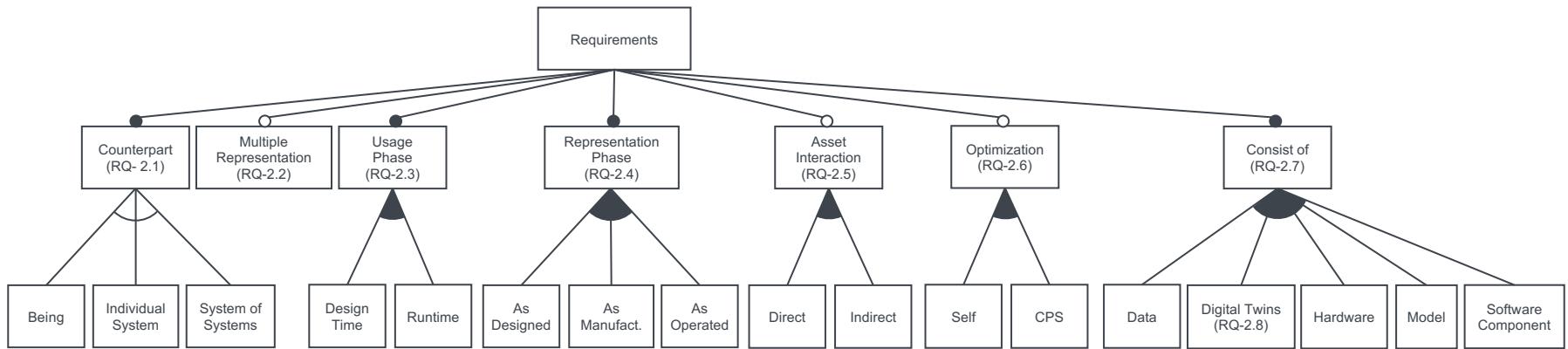
# In Literatur: Verschiedene Formen, Zwecke, Realisierungen, Zeitpunkte

Zwei wesentliche Dimensionen: Verhalten und Nutzungszeit



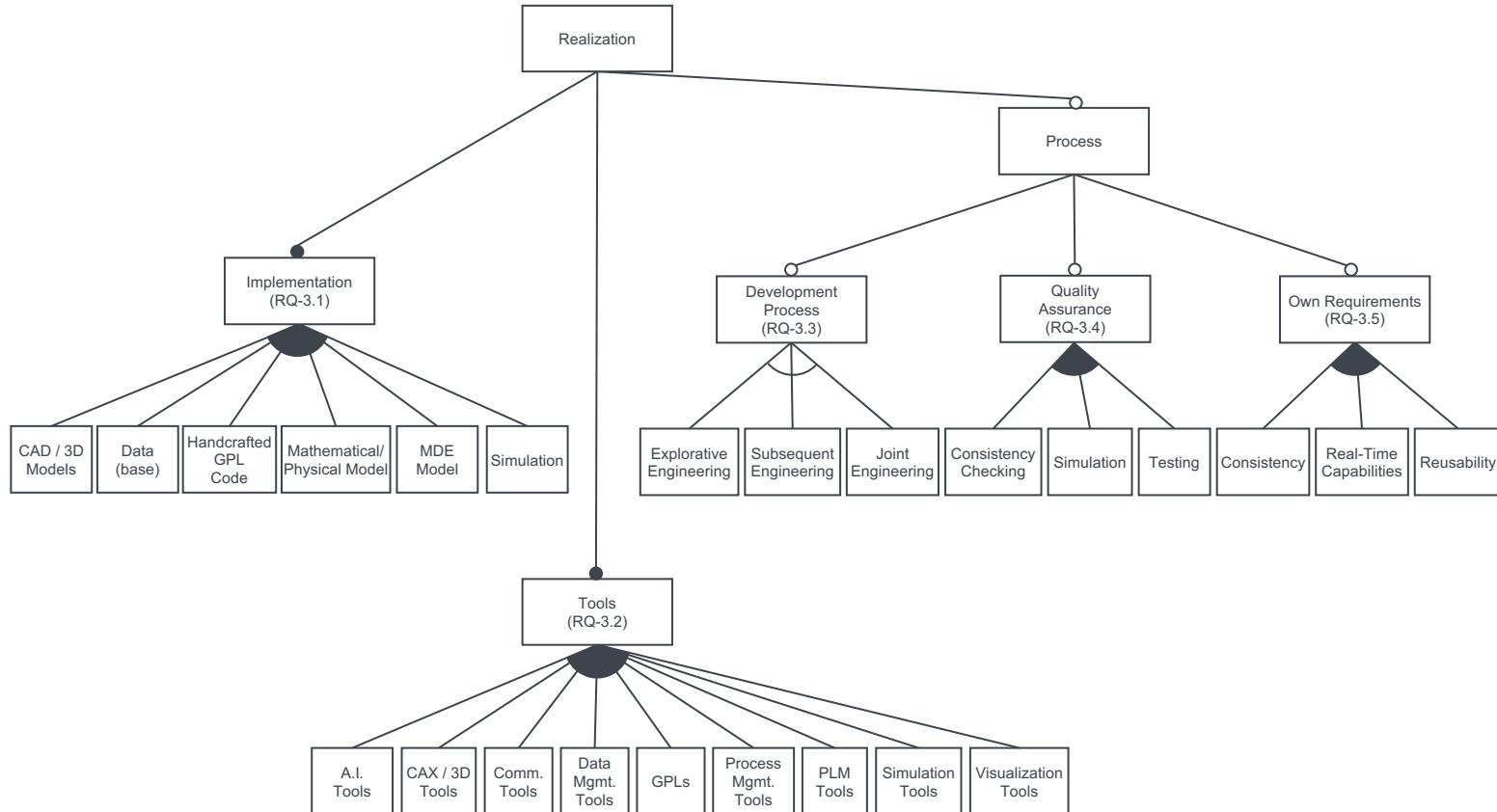
# Dimensionen Digitaler Zwillinge

## Anforderungen



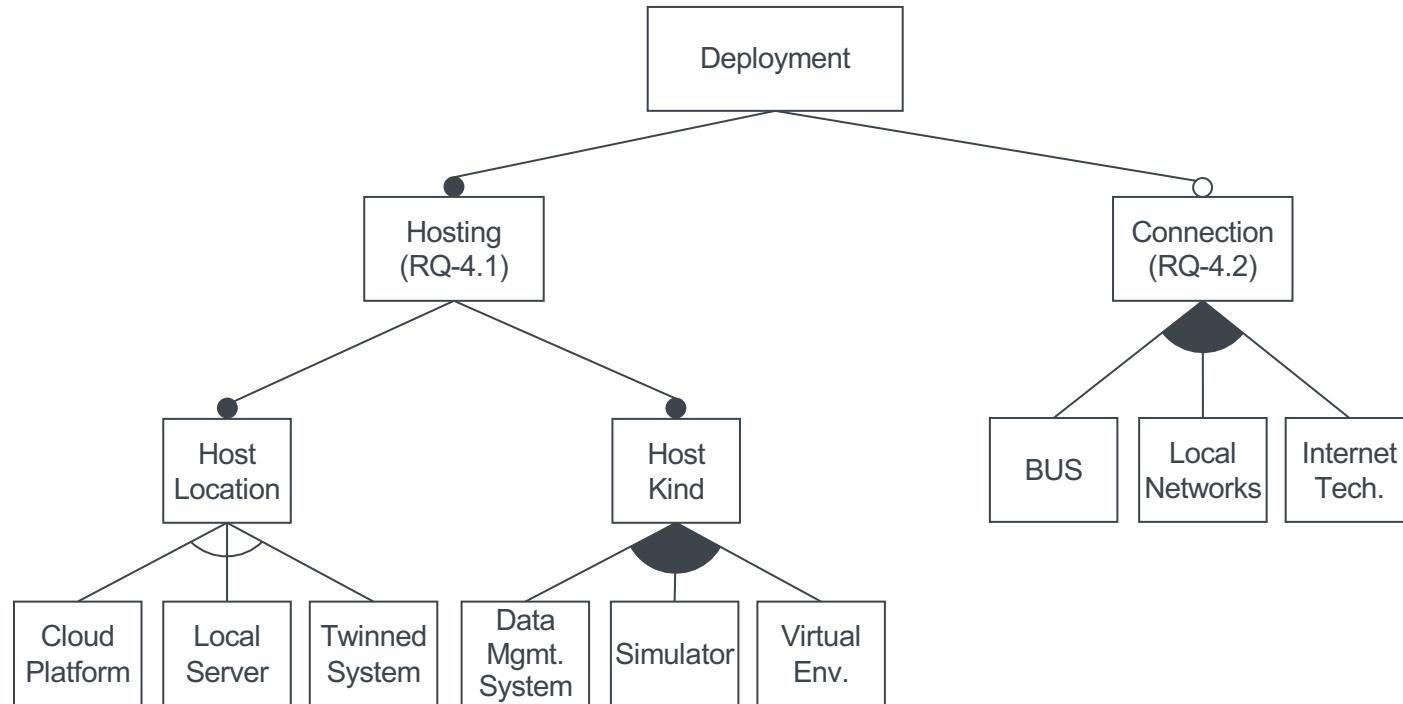
# Dimensionen Digitaler Zwillinge

## Implementierung



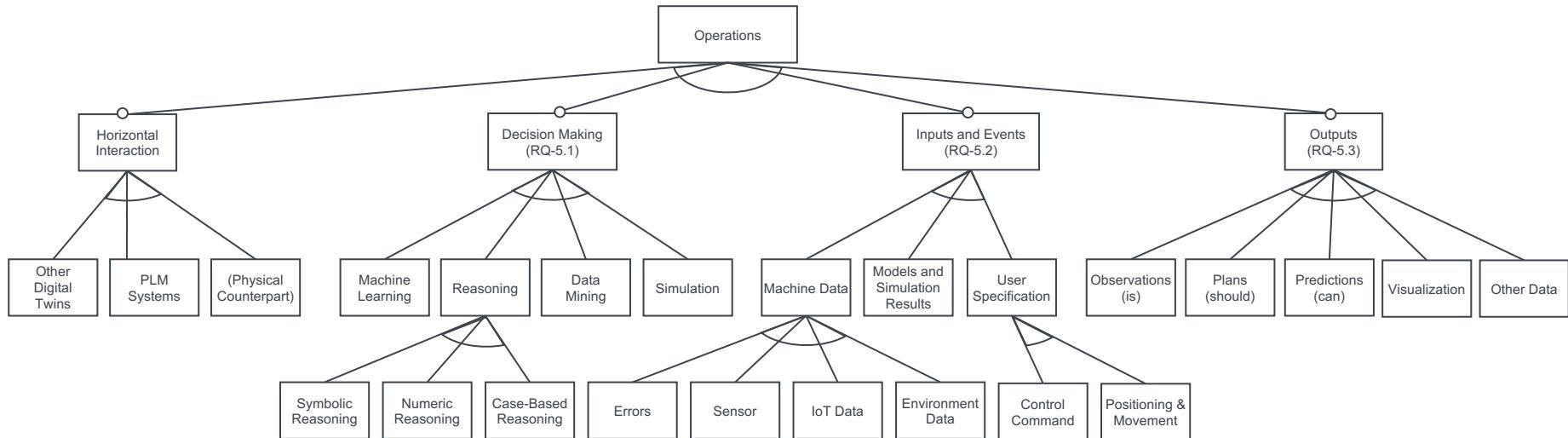
# Dimensionen Digitaler Zwillinge

## Deployment



# Dimensionen Digitaler Zwillinge

## Betrieb



# Wie Digitale Zwillinge beschrieben werden

## Rekurs auf undefinierte Begriffe

### Ressiv

Verwendung undefinierter Begriffe.

- “**digital avatar**” [74]
- “**replica** of a business process” [337]
- “**mimic** of a real-world asset” [386]
- “digital **equivalent** to a physical product” [523]
- “**digital duplicate**” [1389]

---

M. Dalibor, N. Jansen, D. Schmalzing, R. Rumpe, M. Wimmer, L. Wachtmeister, A. Wortmann. A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins.  
(Erscheint in Journal of Systems and Software; Preprint [www.wortmann.ac/preprints](http://www.wortmann.ac/preprints))

---

# Wie Digitale Zwillinge beschrieben werden

Einschränkung auf bestimmte Domänen oder Technologien

## Ressiv

Verwendung undefinierter Begriffe.

- “**digital avatar**” [74]
- “**replica** of a business process” [337]
- “**mimic** of a real-world asset” [386]
- “digital **equivalent** to a physical product” [523]
- “**digital duplicate**” [1389]

## Schlecht Generalisierbar

Gültig nur für bestimmte System- oder Technologiearten.

- “digital model of the real **network environment**” [379]
- “a virtual representation of a specific **product**” [388]
- “virtual representation **based on AR-technology**” [827]

---

M. Dalibor, N. Jansen, D. Schmalzing, R. Rumpe, M. Wimmer, L. Wachtmeister, A. Wortmann. A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins.  
(Erscheint in Journal of Systems and Software; Preprint [www.wortmann.ac/preprints](http://www.wortmann.ac/preprints))

# Wie Digitale Zwillinge beschrieben werden

Unpragmatisch idealistisch

## Resservativ

Verwendung undefinierter Begriffe.

- “**digital avatar**” [74]
- “**replica** of a business process” [337]
- “**mimic** of a real-world asset” [386]
- “digital **equivalent** to a physical product” [523]
- “**digital duplicate**” [1389]

## Schlecht Generalisierbar

Gültig nur für bestimmte System- oder Technologiearten.

- “digital model of the real **network environment**” [379]
- “a virtual representation of a specific **product**” [388]
- “virtual representation **based on AR-technology**” [827]

## Utopisch

Theoretisch nett, praktisch unpraktikabel

- “integrated virtual model of a real-world system containing **all of its physical information**” [393]
- “a **complete** virtual representation of a physical part or process” [1079]

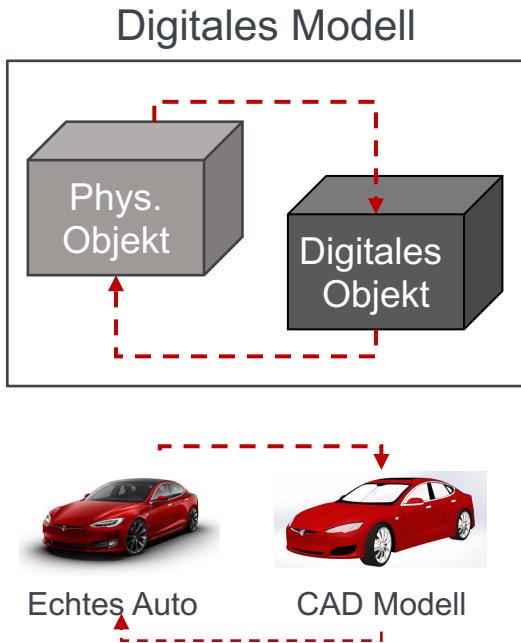
M. Dalibor, N. Jansen, D. Schmalzing, R. Rumpe, M. Wimmer, L. Wachtmeister, A. Wortmann. A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins.  
(Erscheint in Journal of Systems and Software; Preprint [www.wortmann.ac/preprints](http://www.wortmann.ac/preprints))

Anregung I

Die meisten **Definitionen** des  
Begriffs „Digitaler Zwilling“  
ermöglichen **keine Abgrenzung**,  
**sind kaum generalisierbar**, oder  
**nicht praktikabel**.

# Eine qualitative Betrachtung basierend auf Datenflüssen

Art und Richtung der Datenflüsse bestimmen welcher Art das digitale Objekt ist

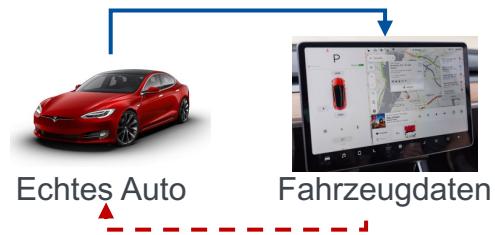
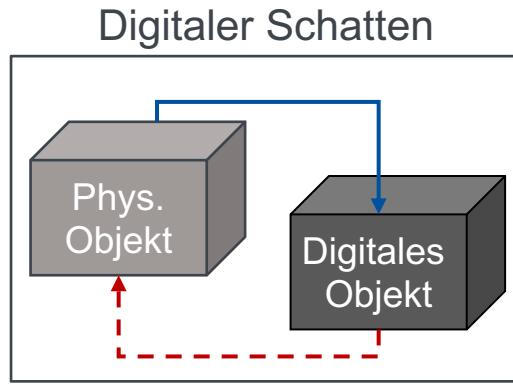
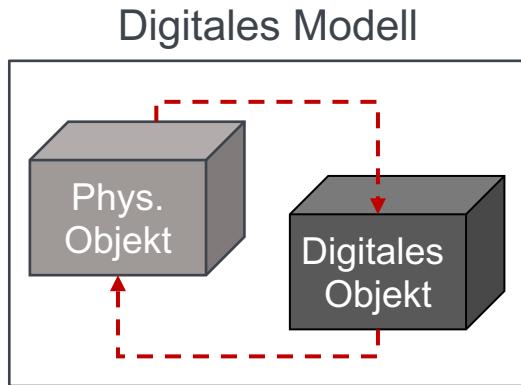


—→ Manueller Datenfluss      → Automatischer Datenfluss

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 2018.

# Eine qualitative Betrachtung basierend auf Datenflüssen

Art und Richtung der Datenflüsse bestimmen welcher Art das digitale Objekt ist

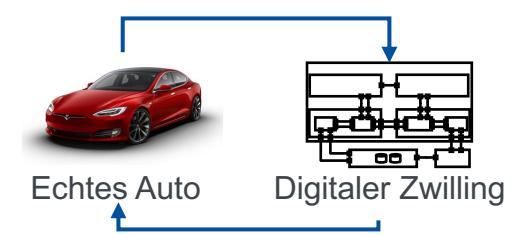
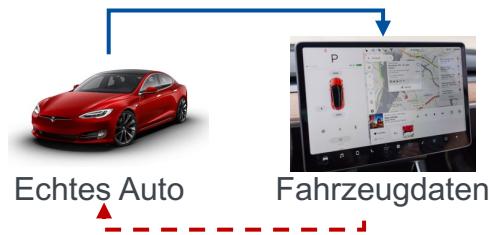
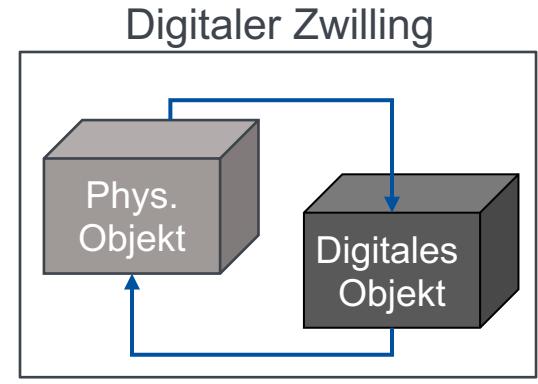
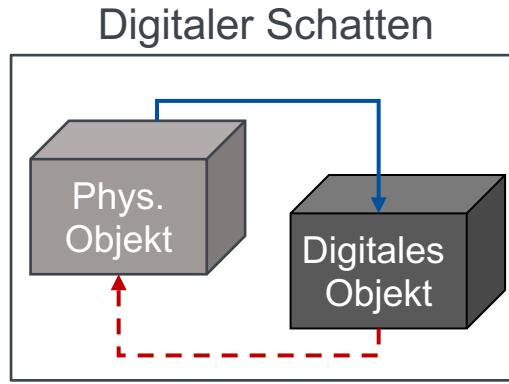
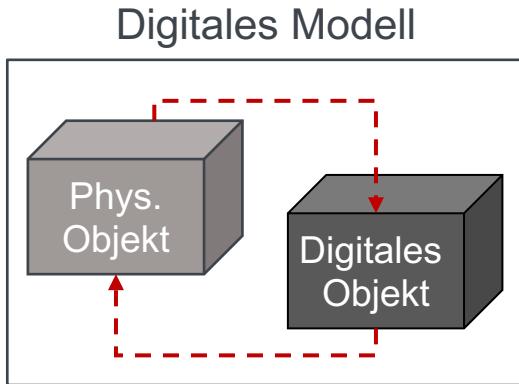


→ Manueller Datenfluss → Automatischer Datenfluss

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 2018.

# Eine qualitative Betrachtung basierend auf Datenflüssen

Art und Richtung der Datenflüsse bestimmen welcher Art das digitale Objekt ist



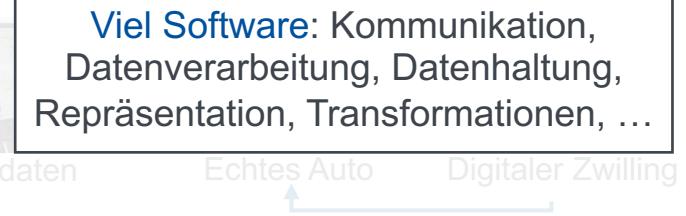
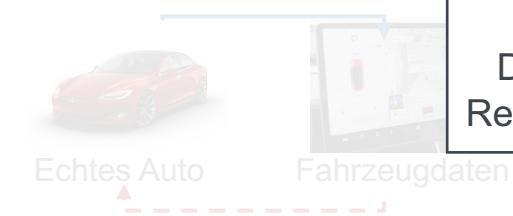
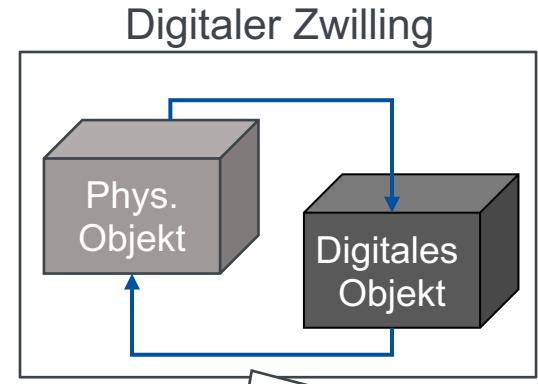
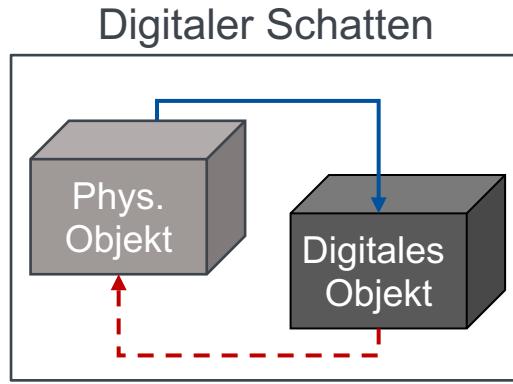
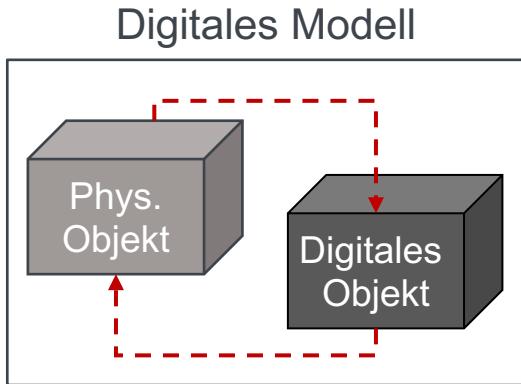
→ Manueller Datenfluss

→ Automatischer Datenfluss

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 2018.

# Eine qualitative Betrachtung basierend auf Datenflüssen

Art und Richtung der Datenflüsse bestimmen welcher Art das digitale Objekt ist

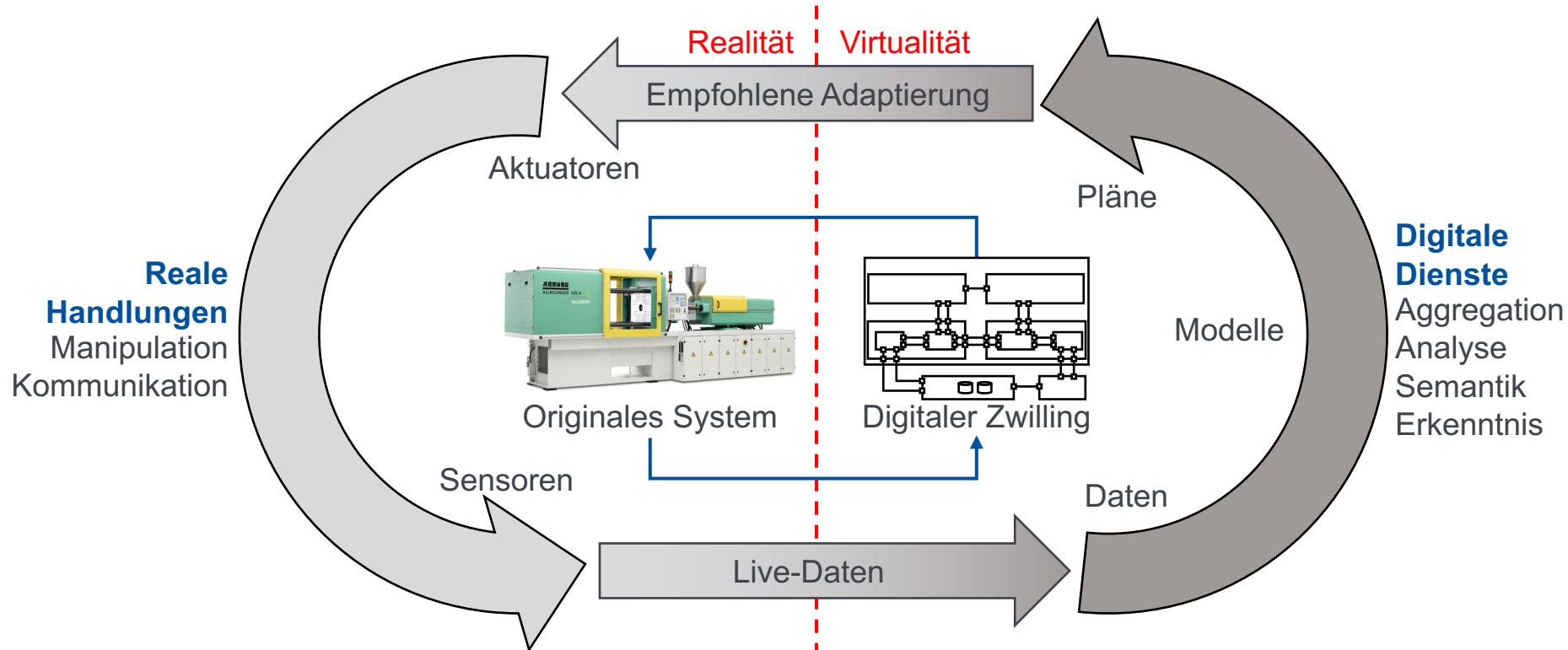


→ Manueller Datenfluss → Automatischer Datenfluss

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 2018.

# Schema Digitaler Zwillinge

Als adaptive Software-Systeme



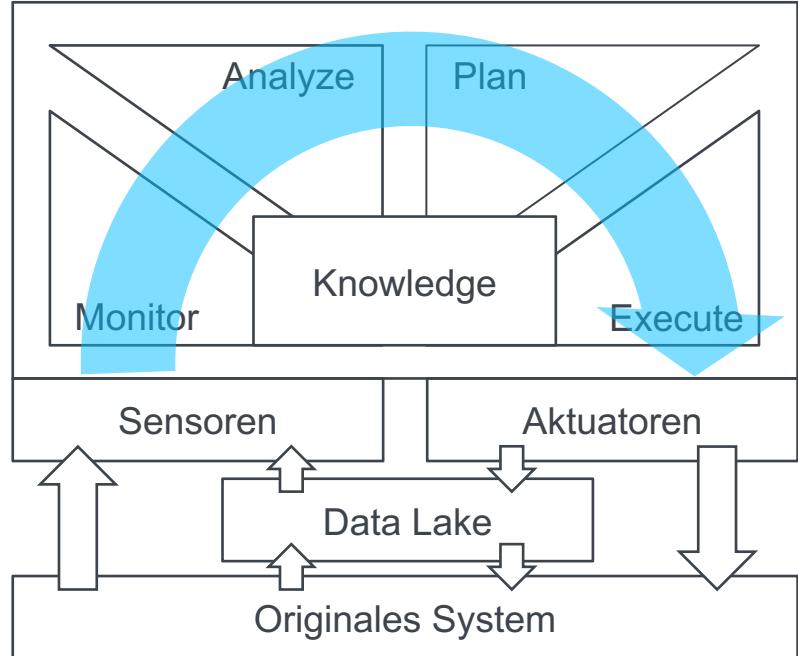
Anregung II

**Ein Digitaler Zwilling ist ein Software-System, das Modelle und Dienste verwendet, um das Originalsystem zweckgerichtet während seines Lebenszyklus zu repräsentieren und zu manipulieren.**

# Selbst-Adaptiver Digitaler Zwilling zur Optimierung von Systemverhalten

Basierend auf der MAPE-K Feedbackschleife für selbst-adaptive Systeme

- **Monitor**
  - Beobachte Verhalten des CPS
- **Analyze**
  - Analysiere Verhalten und identifiziere Probleme sowie Ziele
- **Plan**
  - Plane Handlungen zum Erreichen der Ziele
- **Execute**
  - Adaptiere das CPS
- **Knowledge**
  - Analyseregeln, Handlungen, Modelle, ...

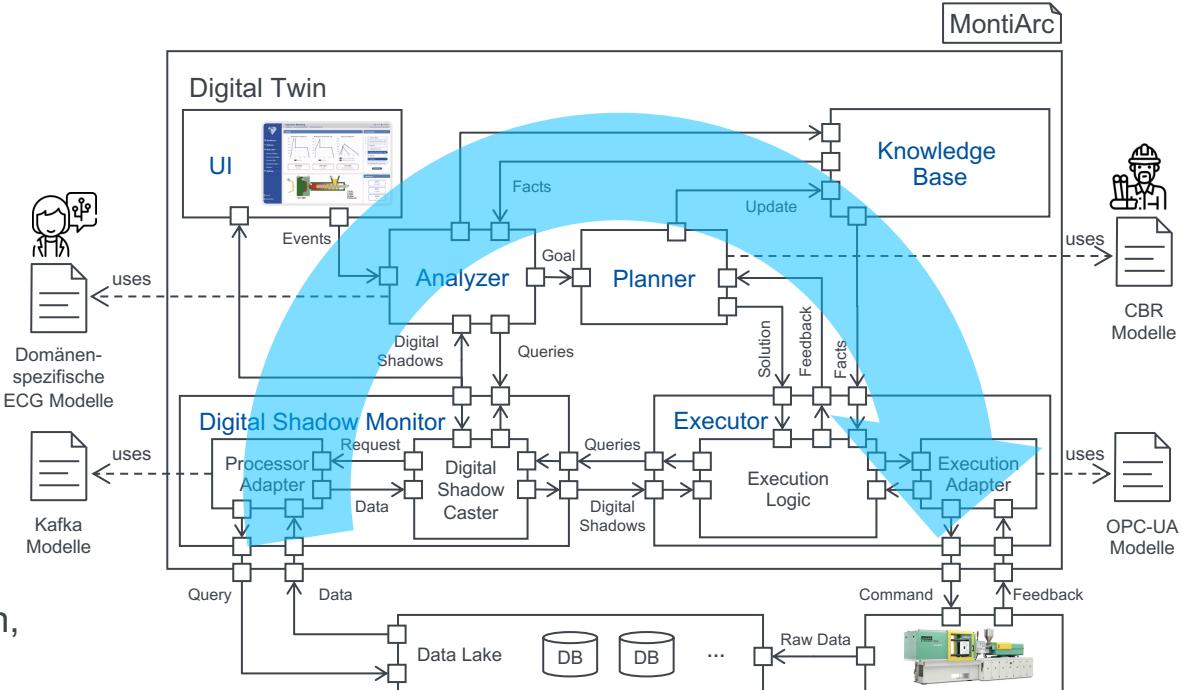


T. Bolender, G. Bürenich, M. Dalibor, B. Rumpe, A. Wortmann: Self-Adaptive Manufacturing with Digital Twins. In: 2021 International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS), pp. 156-166, IEEE Computer Society, 2021.

# Kern-Architektur des Digitalen Zwillings

## Als Modell der MontiArc Architekturbeschreibungssprache

- **Monitor**
  - Beobachte das CPS
  - Erzeuge digitale Schatten
- **Analyze**
  - Finde Probleme und Ziele
- **Plan**
  - Handlungsplanung
- **Execute**
  - Adaptiere CPS
- **Knowledge**
  - Analyseregeln, Handlungen, Modelle, Verbindungen, ...



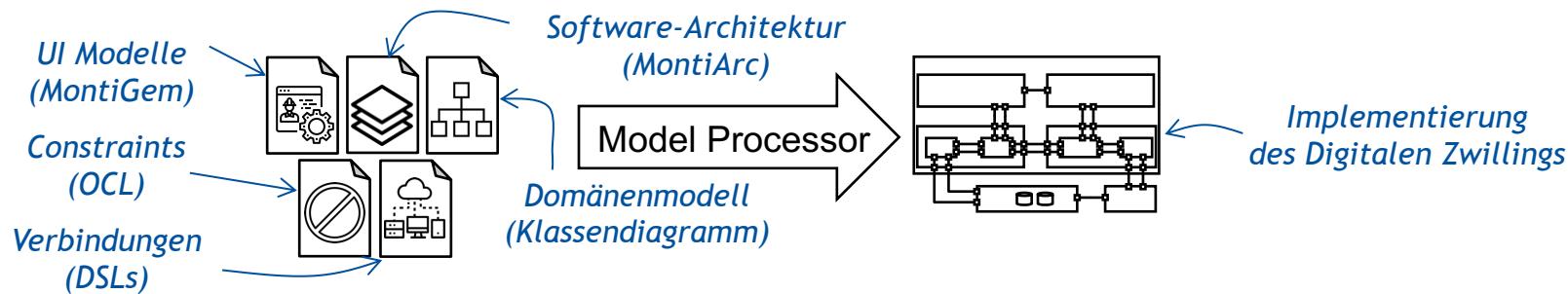
P. Bibow, M. Dalibor, C. Hopmann, B. Mainz, B. Rumpe, D. Schmalzing, M. Schmitz, A. Wortmann: Model-Driven Development of a Digital Twin for Injection Molding. In: S. Dustdar, E. Yu, C. Salinesi, D. Rieu, V. Pant, editors, International Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE'20), pp. 85-100, Grenoble, Springer, 2020.

### Anregung III

**Digitale Zwillinge sind mit einem CPS verbundene, **selbst-adaptive Software-Systeme**, die eine **MAPE-K Feedbackschleife** implementieren, um dieses CPS zu **repräsentieren und zu manipulieren.****

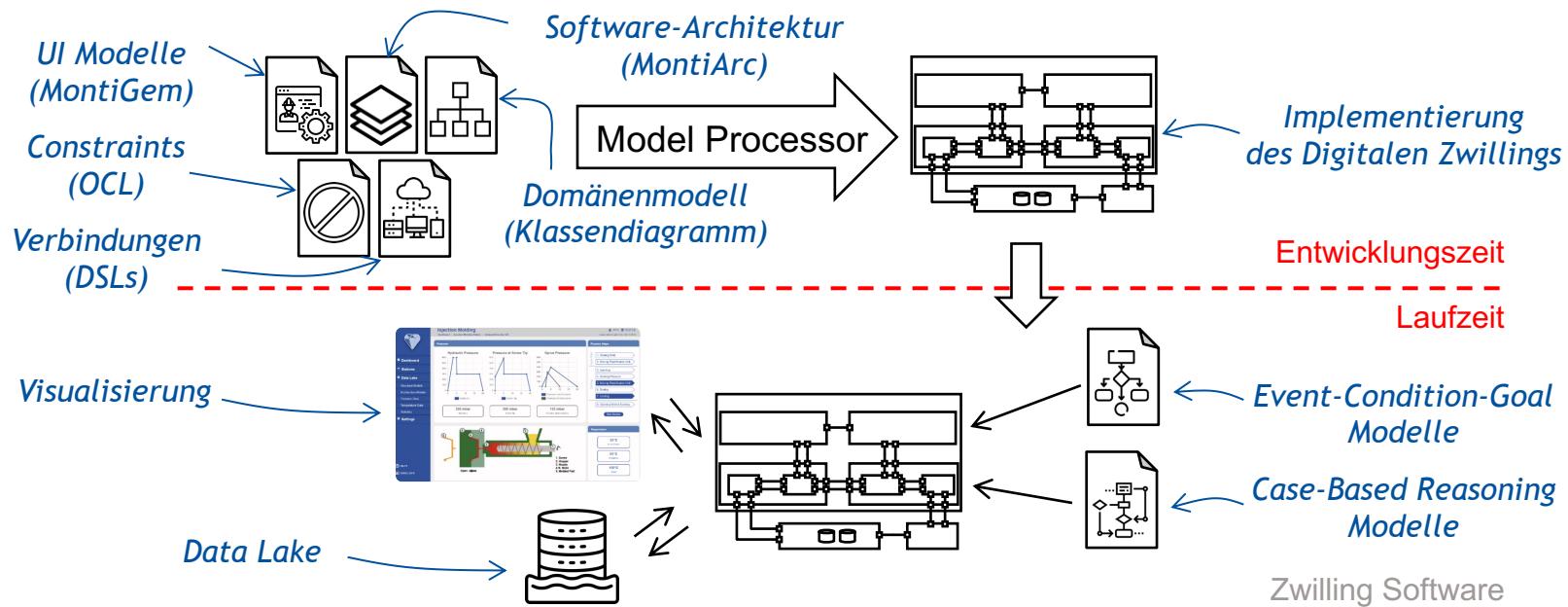
# Schema: Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Software-Experten nutzen geeignete Modellierungstechniken zur Design-Zeit



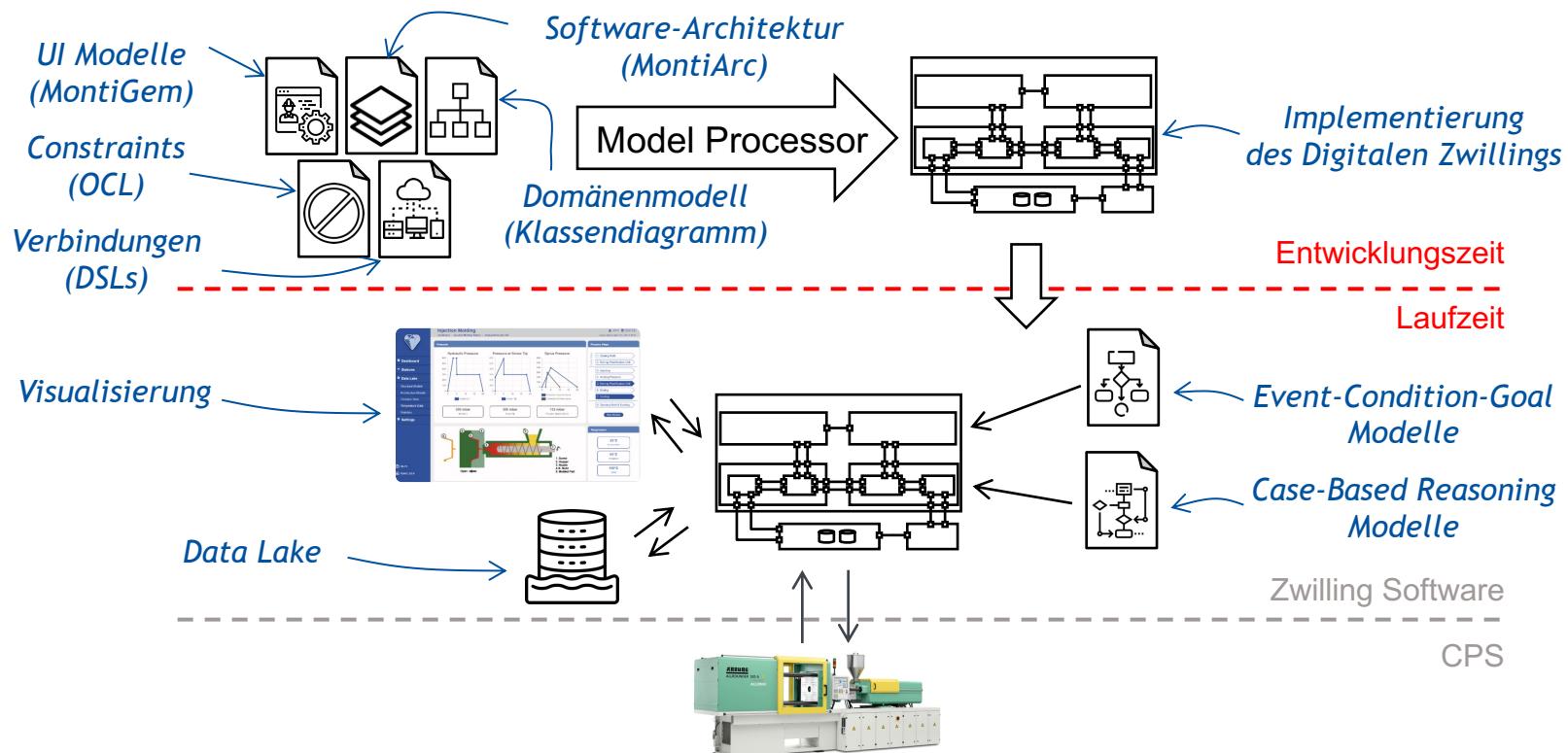
# Schema: Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Domänenexperten nutzen spezifische Modellierungstechniken zur Laufzeit



# Schema: Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Domänenexperten konfigurieren und steuern CPS durch geeignete Modelle

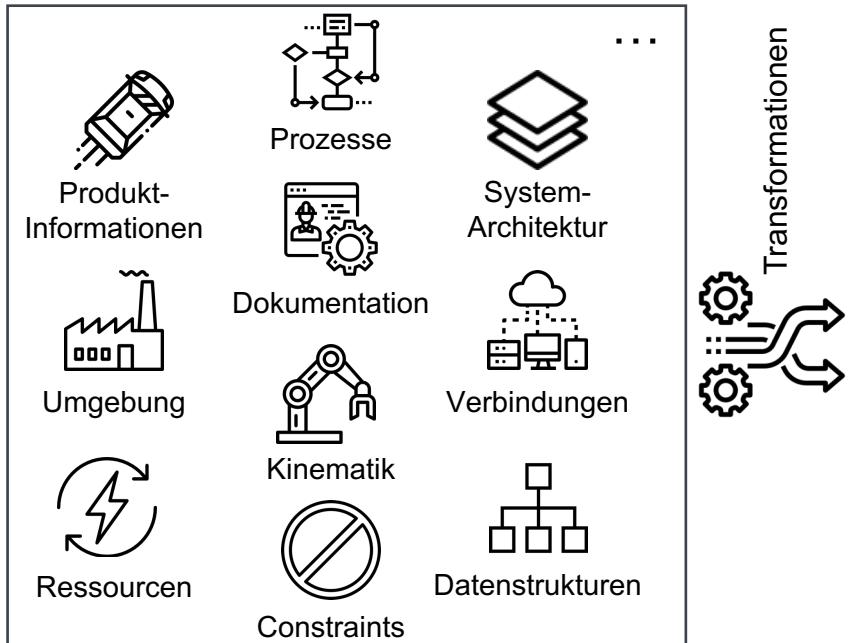


Beobachtung I

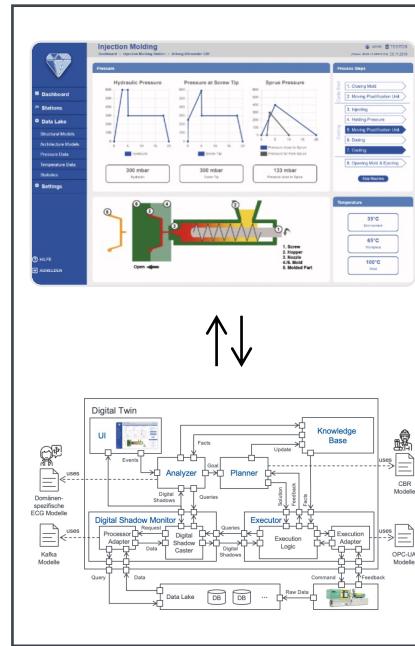
**Unsere Software-Architektur  
Digitaler Zwillinge wird aus Modellen  
generativ erzeugt und interpretiert  
domänenspezifische Verhaltens-  
modelle zur Laufzeit.**

# Automatische Synthese der Architekturen Digitaler Zwillinge

## Aus Entwicklungs-, Simulations-, und Softwaremodellen



Entwicklungs-, Simulations-  
und Software-Modelle



Implementierung des  
Digitalen Zwillings

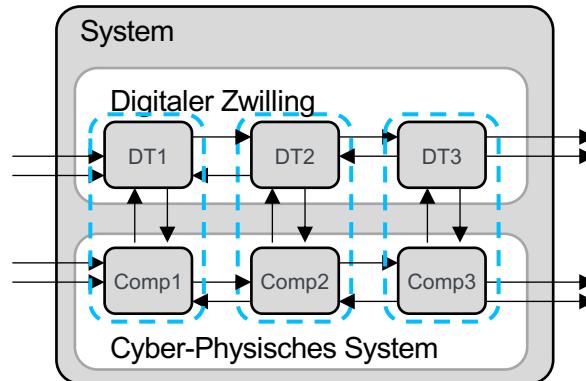
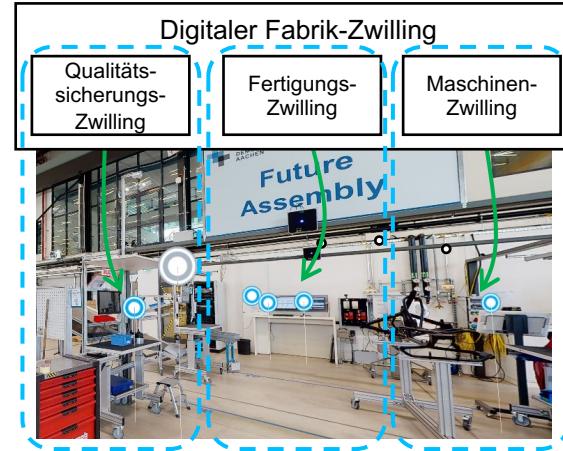
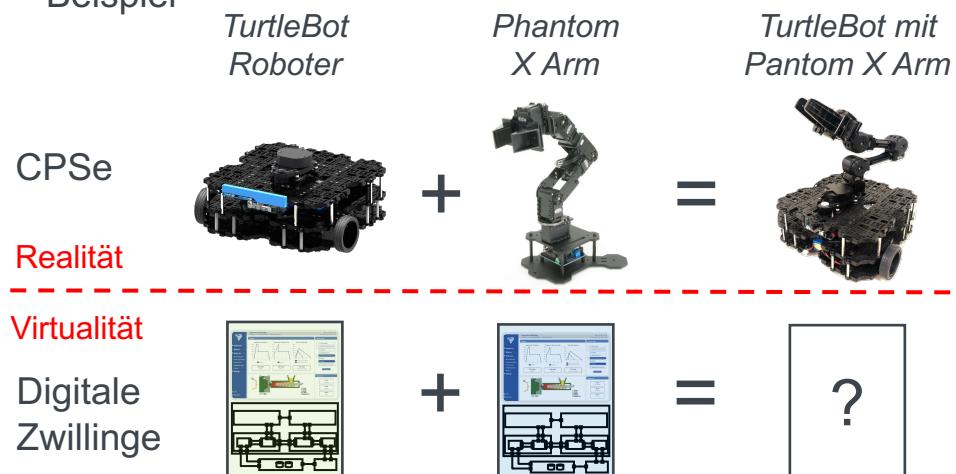
- Software-Architektur
- Datenverwaltung, UI, ...
- Effiziente Daten- erfassung und -analyse
- Selbstadaptive Verhaltensoptimierung
- Prädiktive Wartung
- DevOps
- Lernen
- ...

# Komposition Digitaler Zwillinge ist unerlässlich für effiziente Entwicklung

## Für deren effiziente Entwicklung

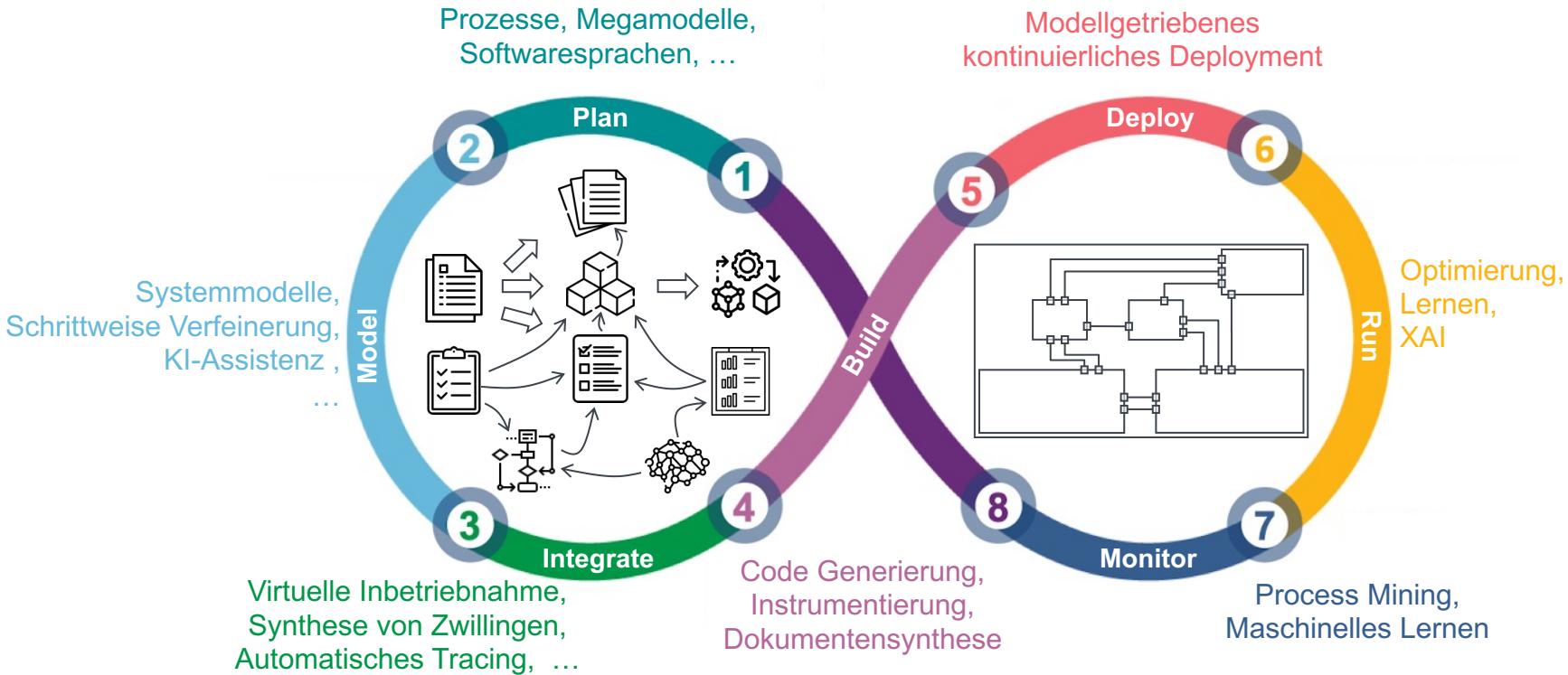
- Komposition in vielen Disziplinen wesentlich:
  - Beispiele: *Funktionen (Mathematik)*, *Produkte (Mechanik)*, *Software-Artefakte (Informatik)*, ...

- Beispiel

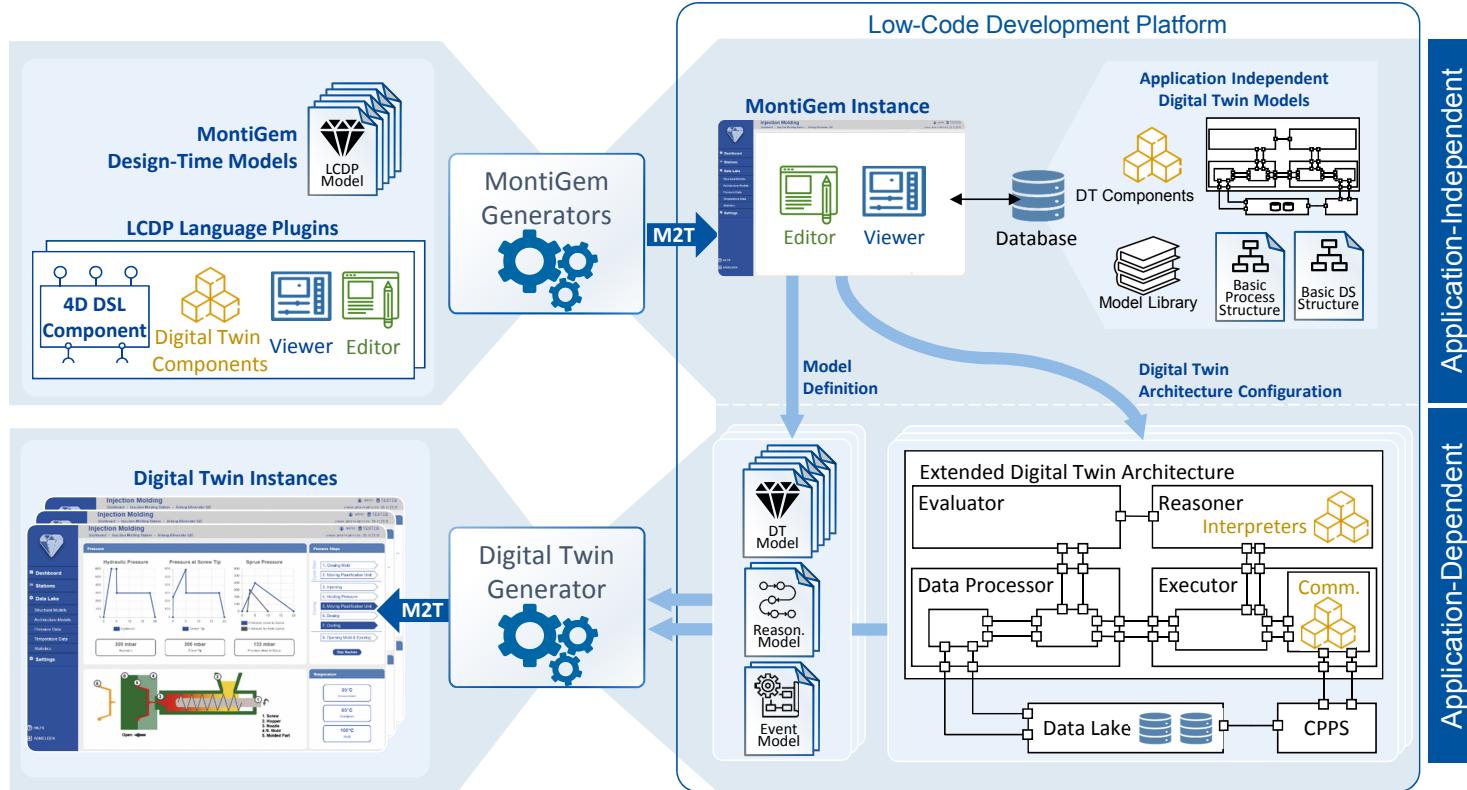


# Digitale Zwillinge als Basis eines modellgetriebenen DevOps

Design-Zeit Systemmodellierung trifft Laufzeit Datenanalyse



# Digitale Zwillinge für alle



M. Dalibor, J. Michael, B. Rumpe, S. Varga, A. Wortmann: Towards a Model-Driven Architecture for Interactive Digital Twin Cockpits. In: Conceptual Modeling, 2020.

J. C. Kirchhof, J. Michael, B. Rumpe, S. Varga, A. Wortmann: Model-driven Digital Twin Construction: Synthesizing the Integration of Cyber-Physical Systems with Their Information Systems. In: Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS'20), 2020.

# Weitere Forschungsfragen zum Digitalen Zwilling<sup>1</sup>

Von Konzepten über Entwicklung bis zum Betrieb ist vieles zu erklären

- Wann sind die **Systemgrenzen** zwischen Digitalem Zwilling und verzwilligtem CPS wie zu ziehen?
- Wie migriert man Zwillinge „**as-designed**“ (idealisiert/typen) zu „**as-operated**“ (instanzen) automatisch?
- Wie entwickelt man **Digitale Zwillinge von Software**<sup>2</sup> („cyber/cyber twins“)?
- Wie **komponiert** man komplexe Digitale Zwillinge (Auto) aus einfacheren (Motor, Getriebe, HMI)?
- Wie misst und operationalisiert man die **Abbildungstreue Digitaler Zwillinge**?
- Wie vereinfacht man den **Betrieb Digitaler Zwillinge durch Domänenexperten**?

---

<sup>1</sup> J. Michael, J. Pfeiffer, B. Rumpe, A. Wortmann: Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems. In: 10th IEEE/ACM International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems.

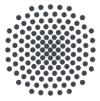
<sup>2</sup> J. Ahlgren et al.: Facebook's cyber–cyber and cyber–physical digital twins. Evaluation and Assessment in Software Engineering. 2021.

# Zusammenfassung

- Es gibt viele Charakterisierungen Digitaler Zwillinge, wenige Definitionen, noch weniger gute
- **Digitale Zwillinge sind wie Pyramiden:** mit viel Aufwand manuell erschaffen
- Wissen über das verzwillingte System wird nicht systematisch wiederverwendet
- Digitale Zwillinge von Teilsystemen werden nicht systematisch wiederverwendet
- Wissen aus dem Betrieb Digitaler Zwillinge wird nicht systematisch wiederverwendet
- Betrieb Digitaler Zwillinge durch Domänenexperten selten vorgesehen
- Viele weitere Herausforderungen<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> J. Michael, J. Pfeiffer, B. Rumpe, A. Wortmann: Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems. In: 10th IEEE/ACM International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems.



**Universität Stuttgart**

Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



**Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann**

E-Mail [wortmann@isw.uni-stuttgart.de](mailto:wortmann@isw.uni-stuttgart.de)

Web [www.wortmann.ac](http://www.wortmann.ac)

Telefon +49 (0) 711 685-84624

Twitter @andwor

Universität Stuttgart

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen

Seidenstraße 36 • 70174 Stuttgart