

**Universität Stuttgart**

Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



# Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

30. Mai 2022



**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**
  - Softwaresprachen
  - Softwarearchitekturen
  - Modellgetriebene Software
  - Anwendung: CPS, IoT, I4.0
- 100+ Publikationen (h: 23, i10: 48)
- 6 Vorlesungen, 12 Seminare/Praktika, 60+ Abschlussarbeiten

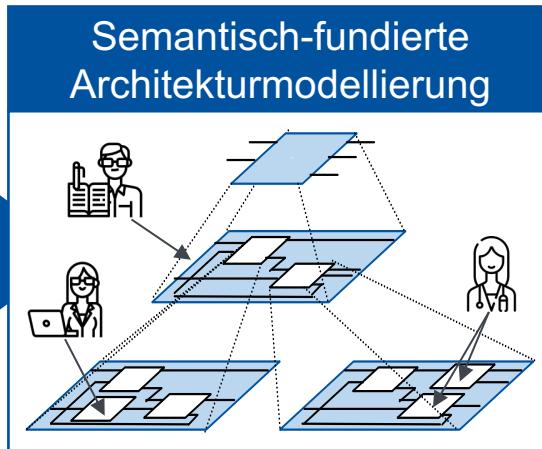


# Themenschwerpunkte

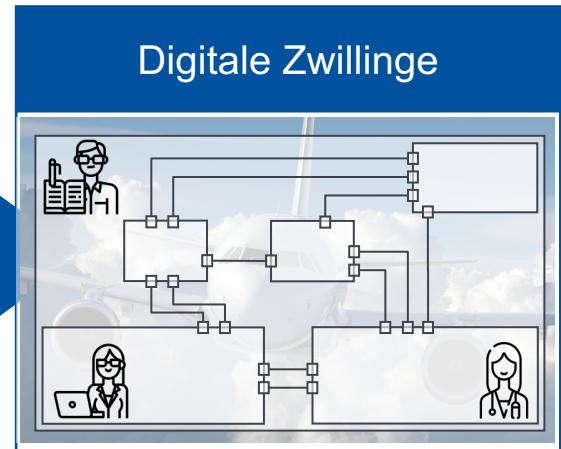
## Bessere Software durch Abstraktion und Automatisierung



- 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

# H1: Komplexität cyber-physischer Systeme wächst dramatisch

Es bedarf geeigneter Techniken diese zu kompensieren

- Cyber-physische Systeme (CPS):
  - **vernetzte technische Systeme** die
  - **physische Prozesse** und
  - **Rechenprozesse** vereinen
- Gesellschaft baut auf CPS
  - Bauwesen, Energieversorgung, Kommunikation, Medizin, Produktion, Transport, ...
- **Mehrwert grossteils Software**
- **Softwarekomplexität wächst** auch durch neue Paradigmen und Technologien
  - Intelligent, verteilt, selbst-adaptiv



Chevy Volt  
(10 Mio. LoC)



Boeing 787  
(14 Mio. LoC)



LHC CERN  
(50 Mio. LoC)



Hochw. Fahrzeug  
(100 Mio. LoC)



Google Dienste  
(2 Mrd. LoC)

Quelle: <https://www.visualcapitalist.com/millions-lines-of-code>

## H2: Überwindung der konzeptuellen Kluft zwischen Domäne und Software

### Durch Abstraktion und Automatisierung



## H2: Überwindung der konzeptuellen Kluft zwischen Domäne und Software

### Durch Abstraktion und Automatisierung



# Was ist ein Modell?

Prof. Herbert Stachowiak, Allgemeine Modelltheorie, 1973

„Ein Modell ist seinem Wesen nach eine in Maßstab, Detailliertheit und/oder Funktionalität verkürzte beziehungsweise **abstrahierte Darstellung** des **originalen Systems**.“



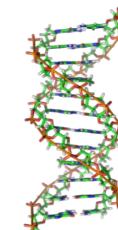
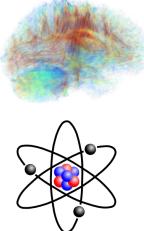
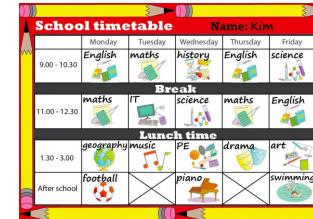
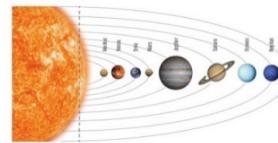
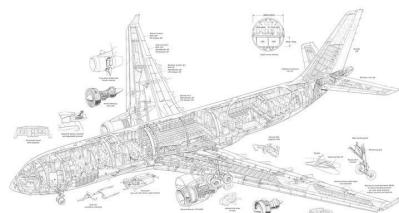
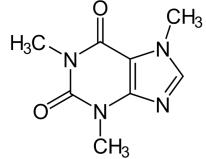
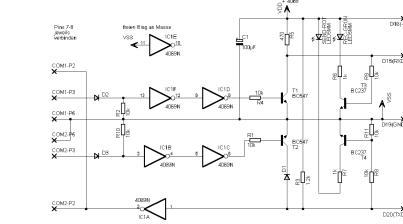
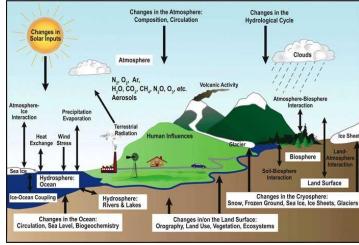
---

Abbildungsmerkmal	Es basiert auf einem Original (= System)
Reduktionsmerkmal	Es reflektiert relevante Eigenschaften des Originals
Pragmatisches Merkmal	Es kann für bestimmte Zwecke anstelle des Originals verwendet werden

---

# Beispiele für Modelle

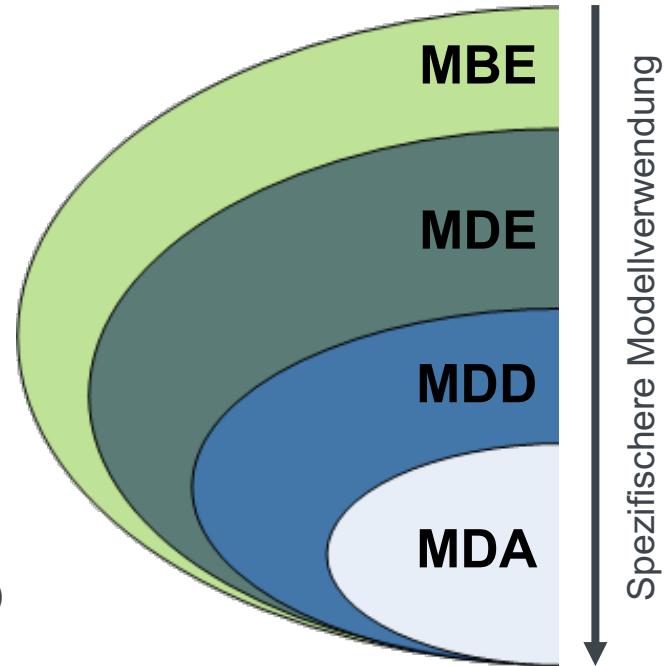
## Abbildung, Reduktion, Pragmatismus



# Modellbasierte und modellgetriebene Entwicklung

## Eine Einordnung

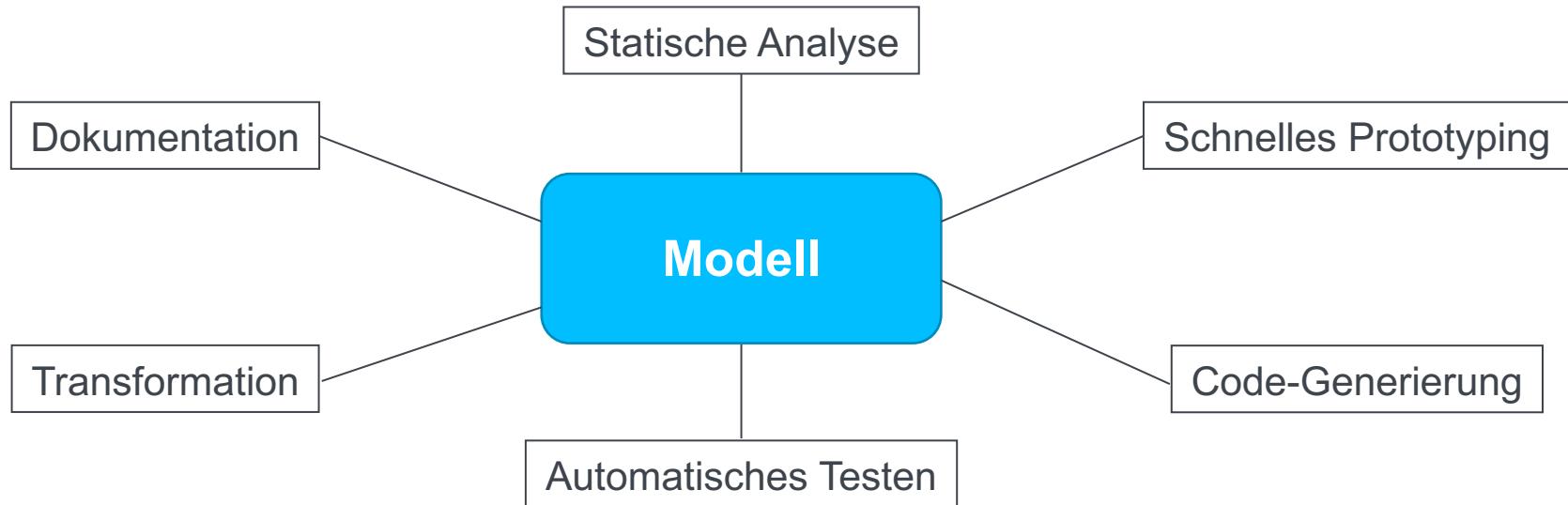
- Model-Based Engineering (MBE)  
Entwicklungsprozesse die Modelle verwenden
- Model-Driven Engineering (MDE)  
Modelle treiben Teile des Prozesses
- Model-Driven Development (MDD)  
Modelle sind Schlüsselartefakte der Entwicklung
- Model-Driven Architecture (MDA)  
Spezielle MDA-Vision der Object Management Group (OMG)



Prof. Jordi Cabot (Open University of Catalonia): <https://modeling-languages.com/clarifying-concepts-mbe-vs-mde-vs-mdd-vs-md/>

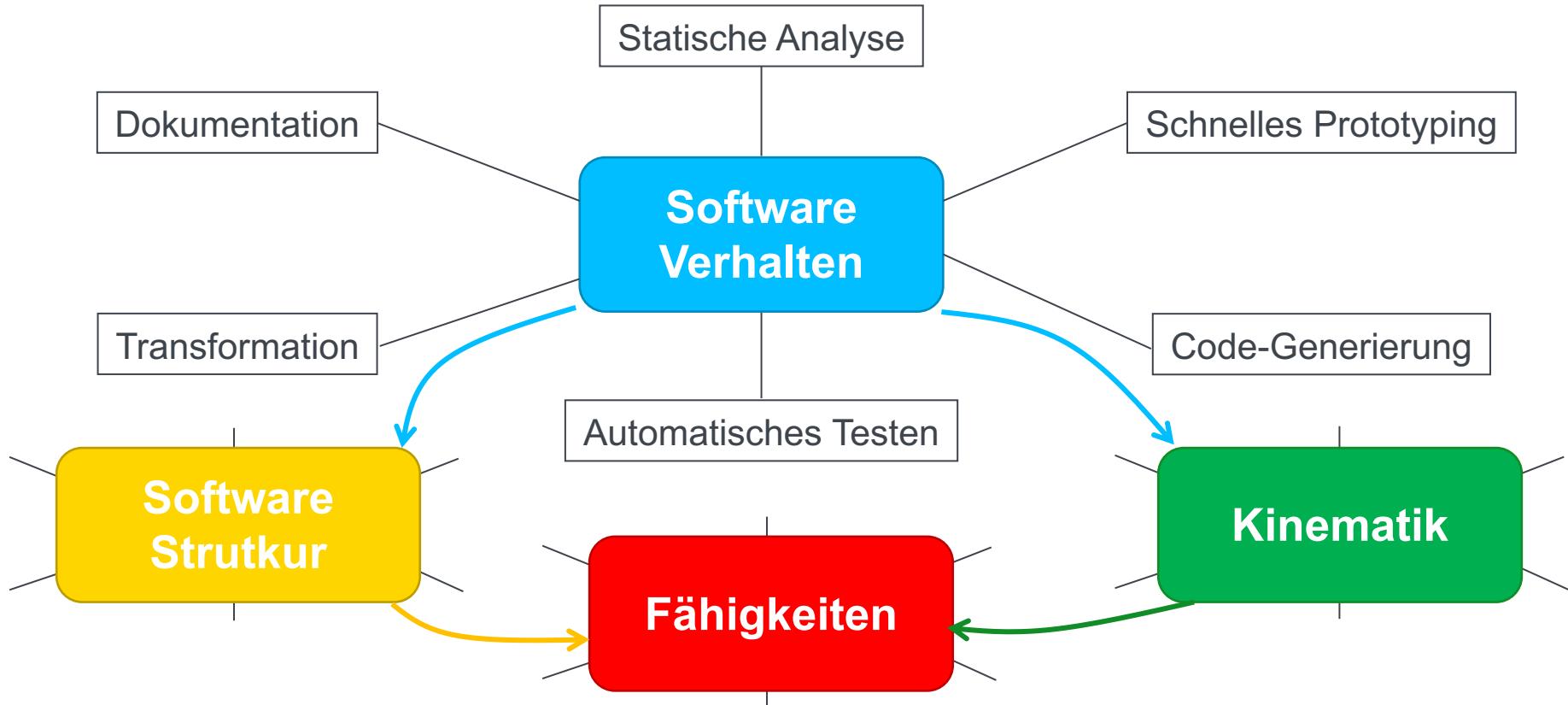
# Modellgetriebene Softwareentwicklung

Modelle dienen verschiedenen Zwecken



# Modellgetriebene Softwareentwicklung

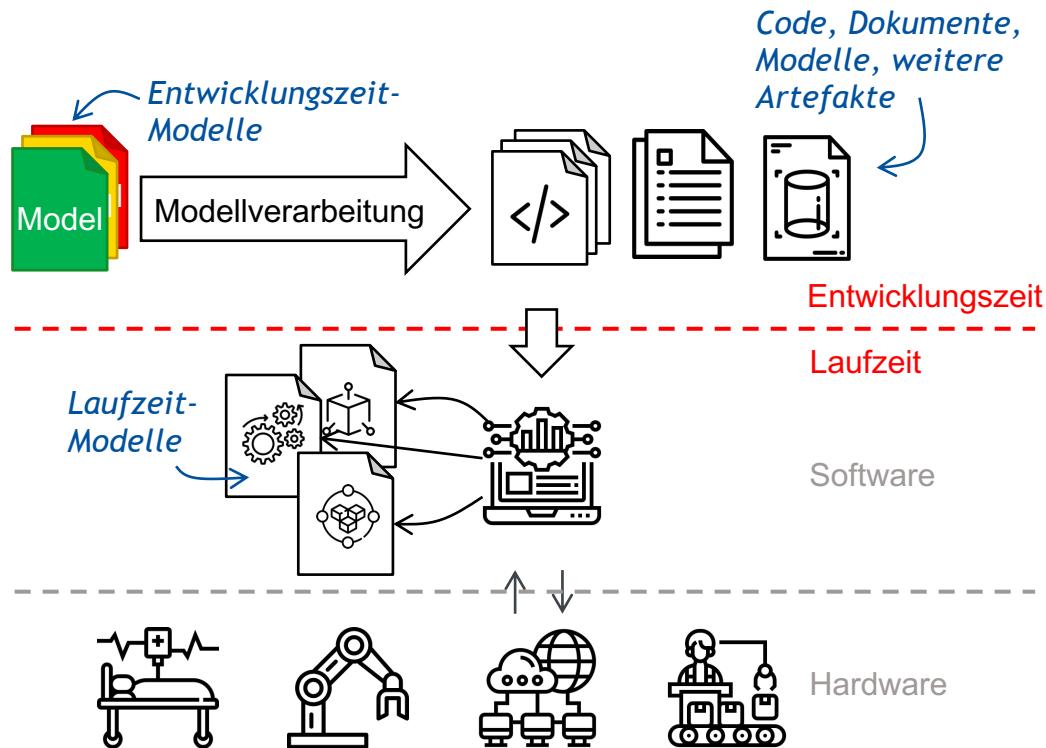
Modelle können verschiedene Sichten abbilden und integrieren



# Modellgetriebene Softwareentwicklung (MDD)

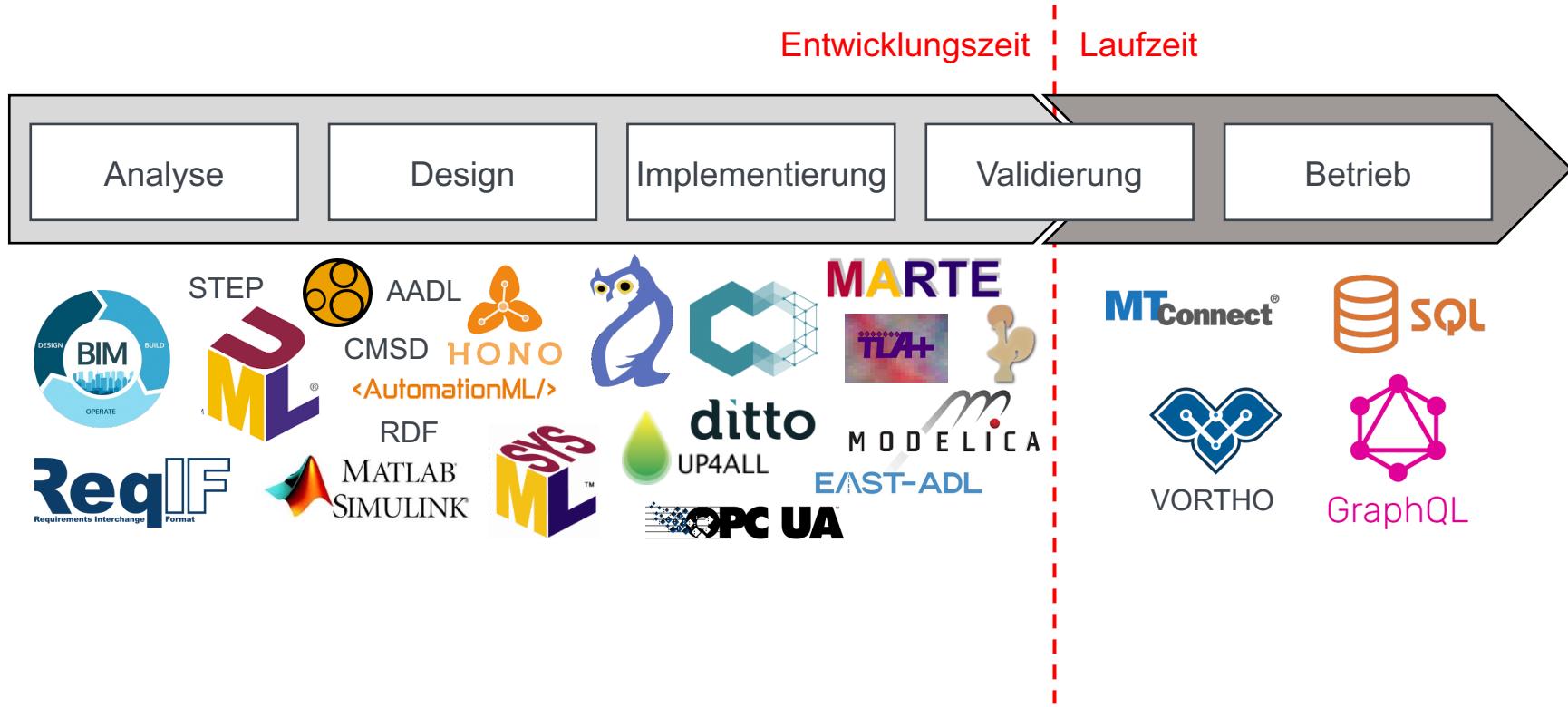
Modelle sind primäre Entwicklungsartefakte

- 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

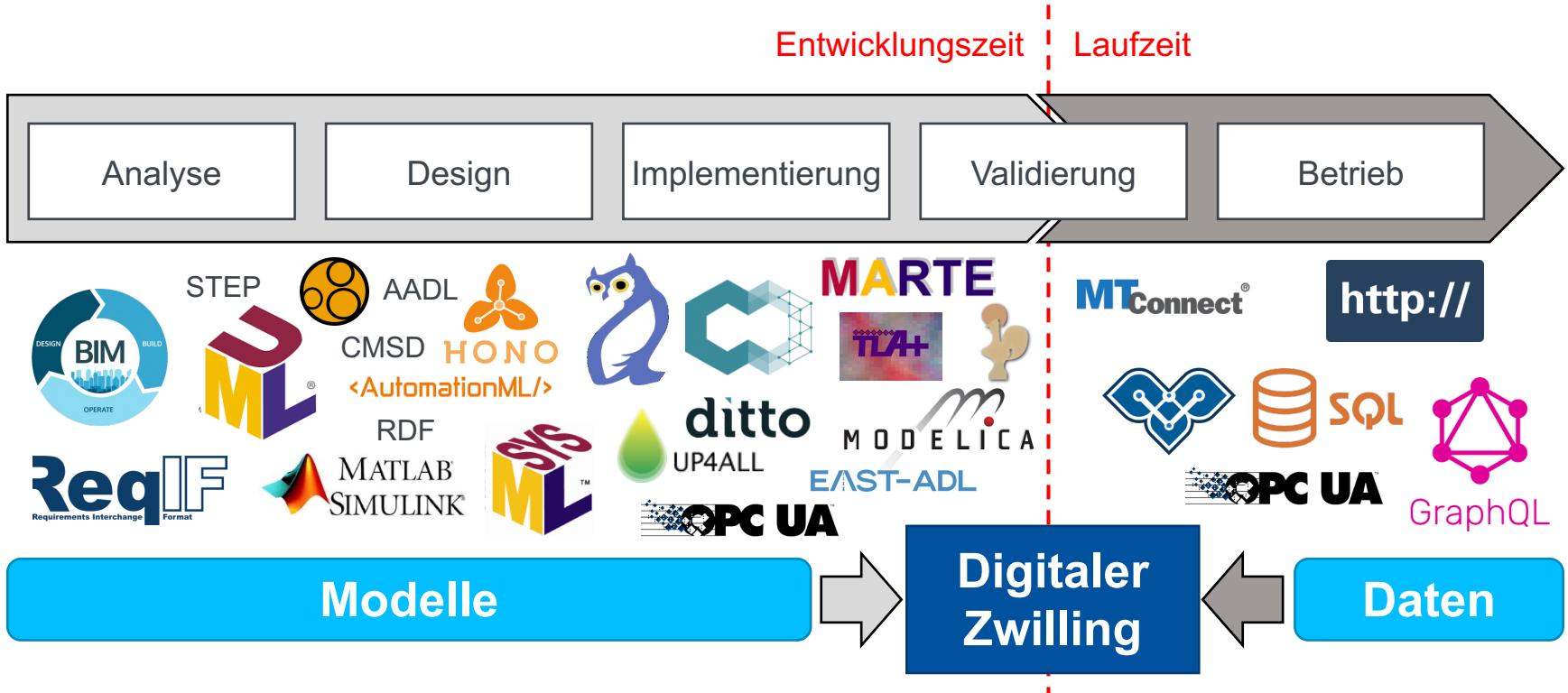


Zusammenfassung I

**Modellgetriebene Software-entwicklung nutzt Modellierungs-sprachen und -Werkzeuge, für effiziente Erzeugung und Betrieb komplexer Software-Systeme.**

# 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?

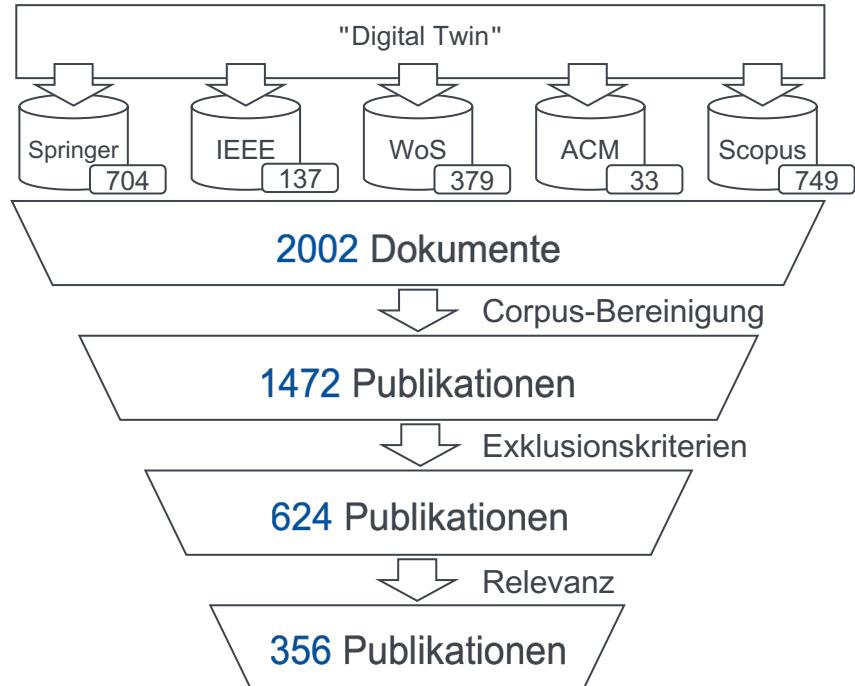
Welche Art von Systemen  
(techn./biolog.) sollen  
verzwilligt werden?

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

# Die umfangreichste Literaturstudie über Digitale Zwillinge

## Forschungsfragen und Überblick

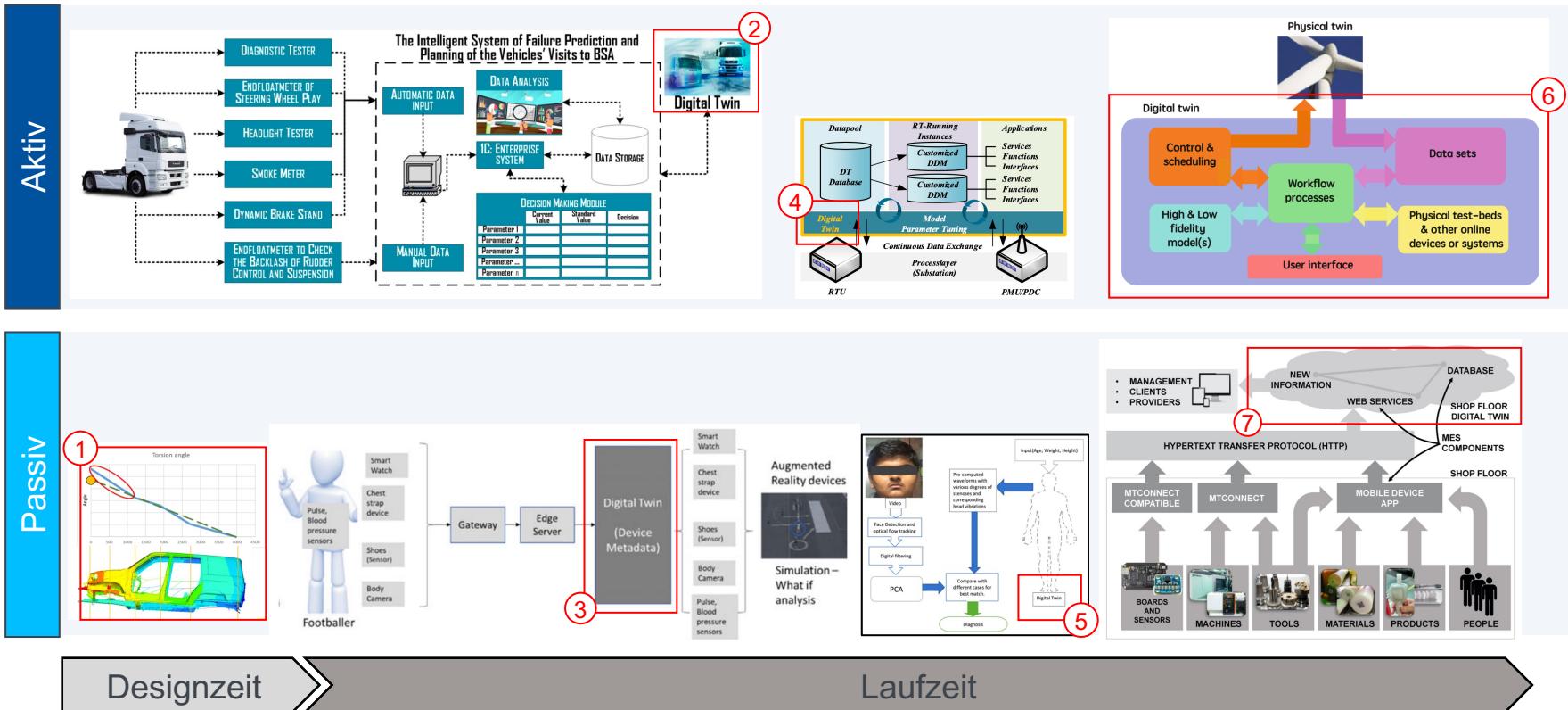
1. Wer nutzt Digitale Zwillinge **wofür**?
2. Welche **Eigenschaften** haben Digitale Zwillinge?
3. Wie werden Digital Zwillinge **entwickelt**?
4. Wie werden Digital Zwillinge **verteilt**?
5. Wie werden Digital Zwillinge **betrieben**?
6. Wie werden Digital Zwillinge **evaluiert**?



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



# 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]

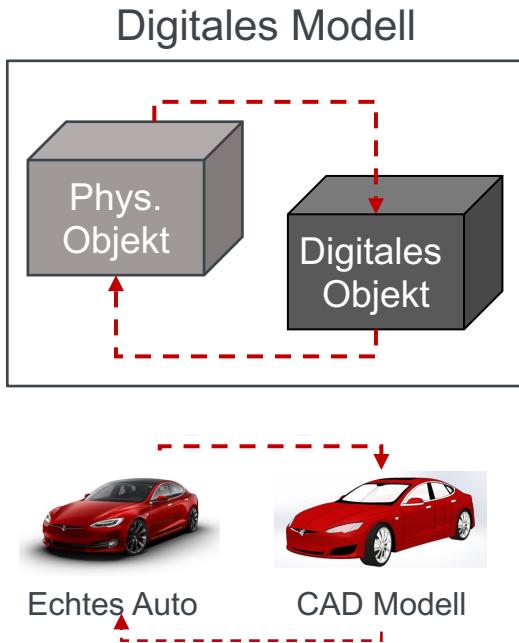
M. Dalibor, N. Jansen, D. Schmalzing, R. Rumpe, M. Wimmer, L. Wachtmeister, A. Wortmann. A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins.  
(Erscheint in Journal of Systems and Software; Preprint [www.wortmann.ac/preprints](http://www.wortmann.ac/preprints))

Zusammenfassung II

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



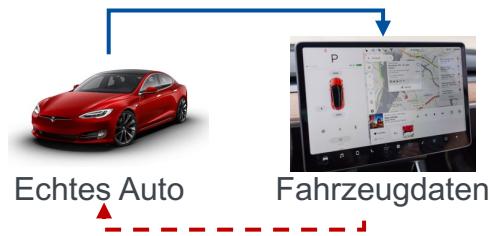
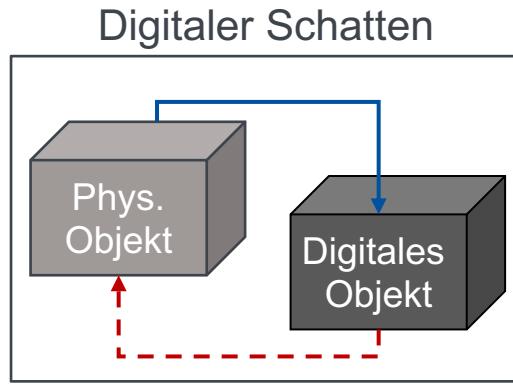
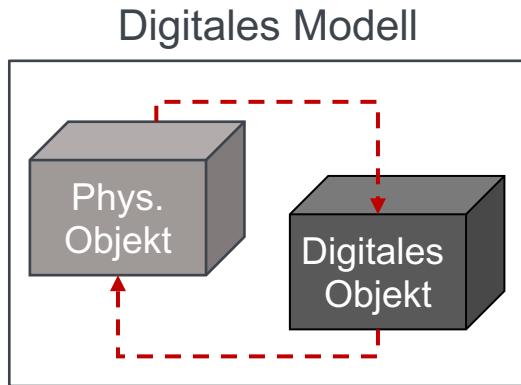
→ Manueller Datenfluss → Automatischer Datenfluss

---

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

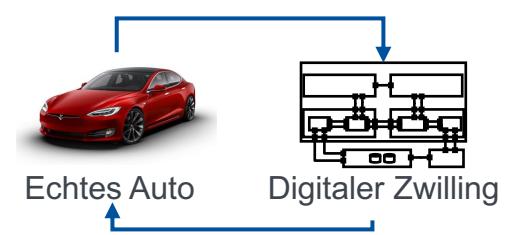
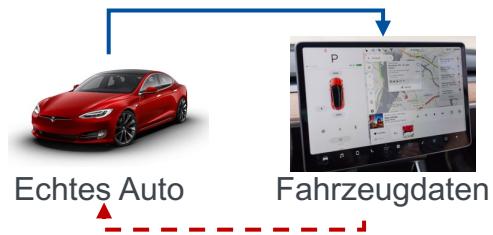
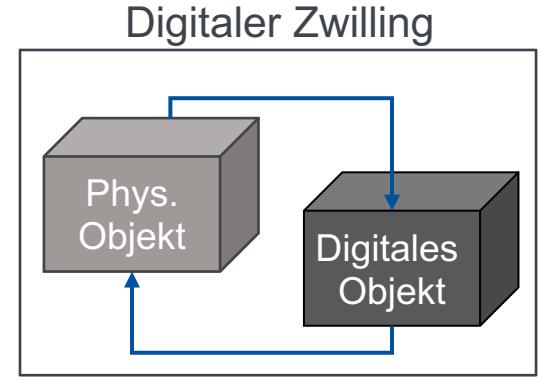
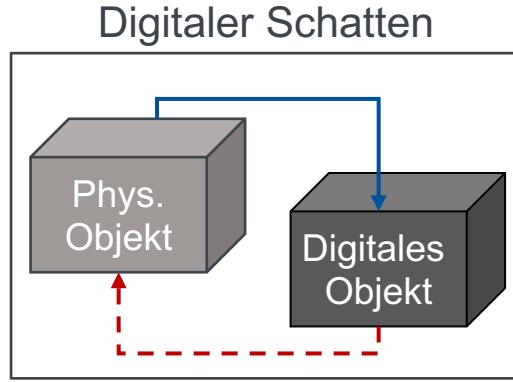
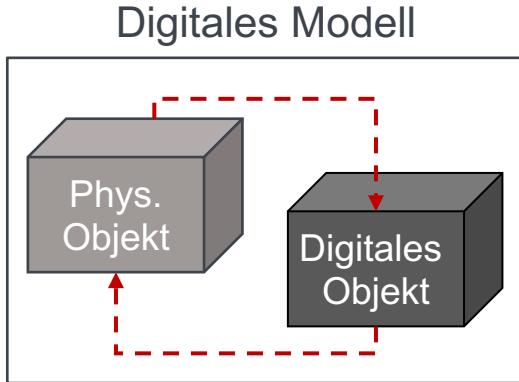


→ Manueller Datenfluss → Automatischer Datenfluss

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



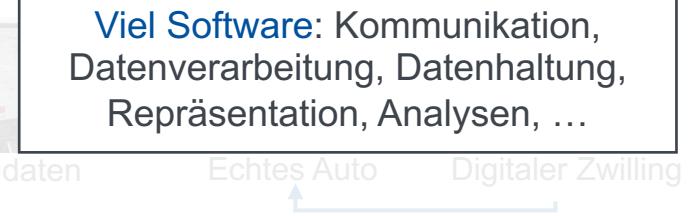
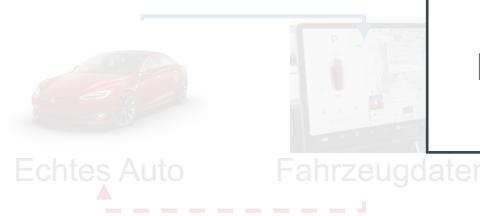
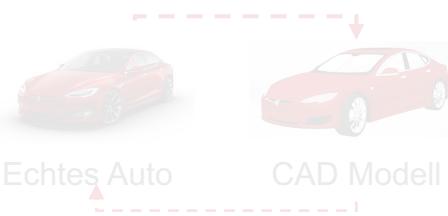
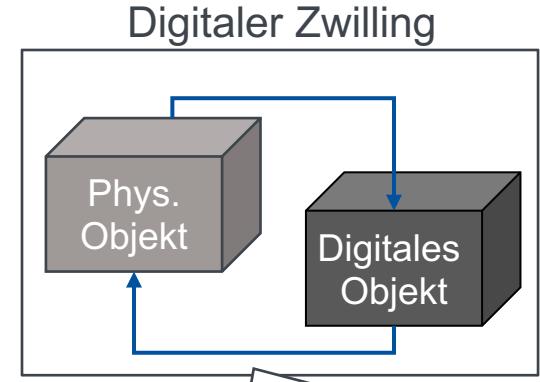
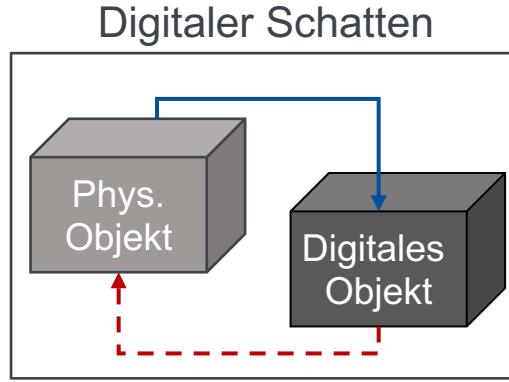
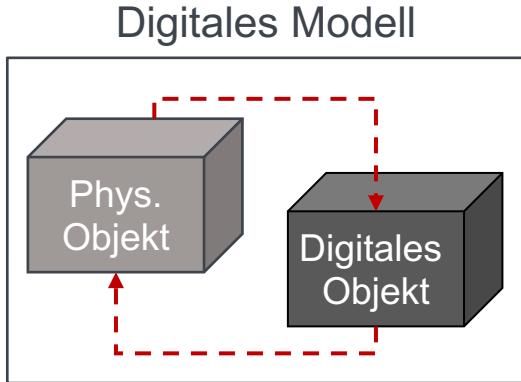
→ Manueller Datenfluss

→ 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



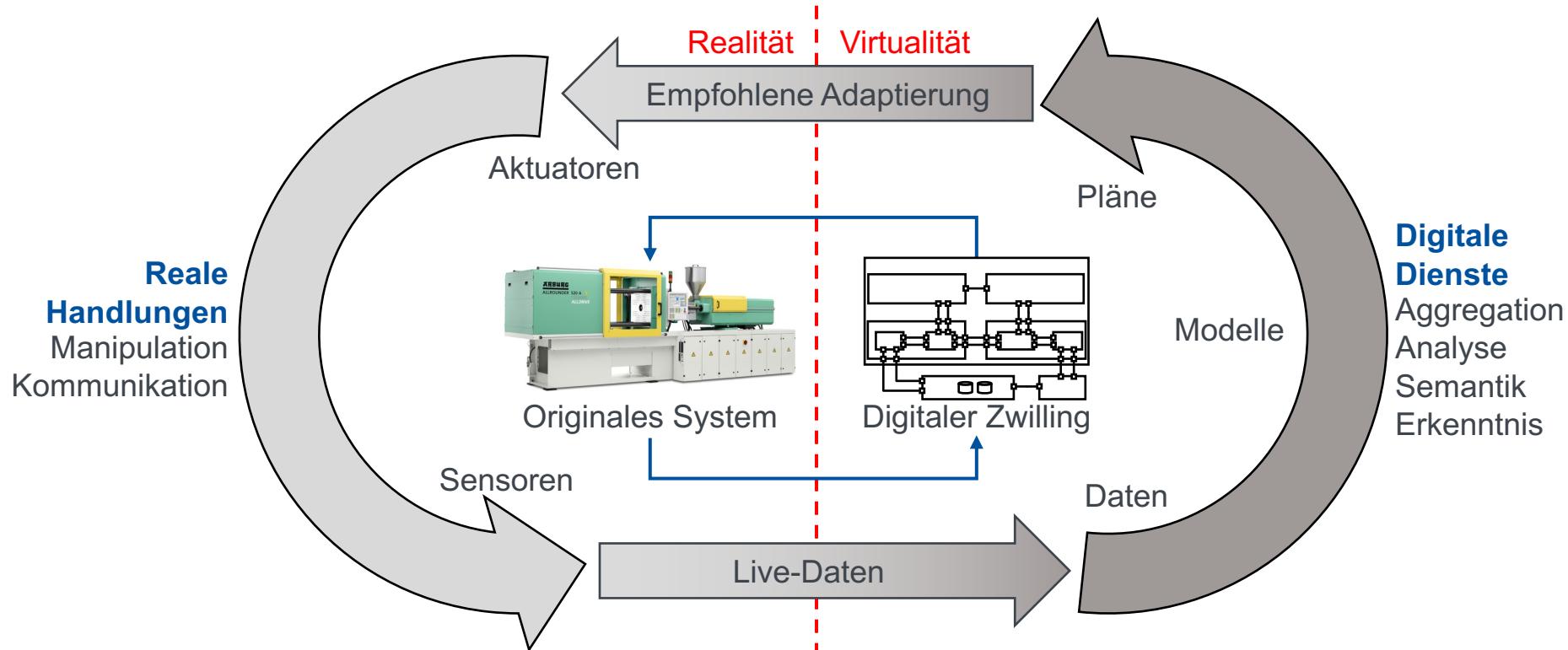
→ Manueller Datenfluss

→ 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



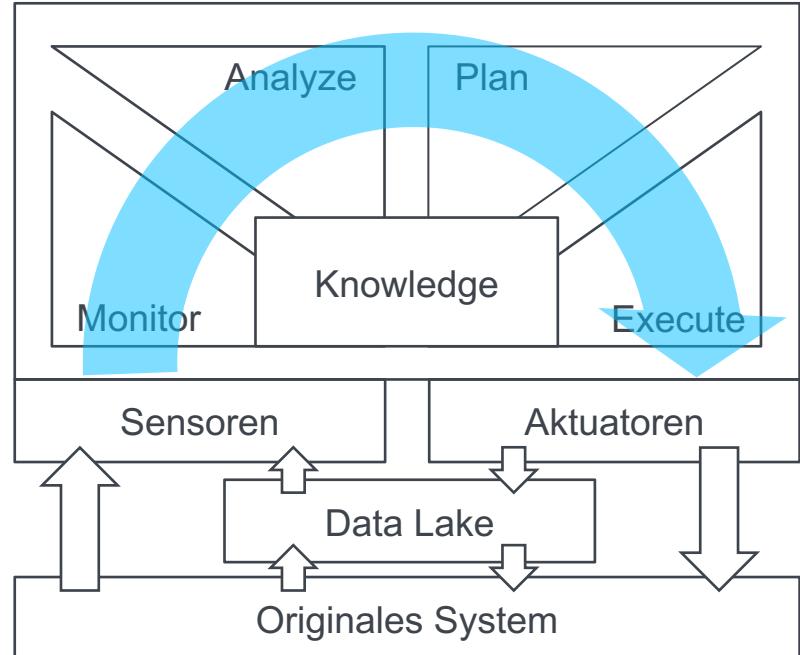
### Zusammenfassung III

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

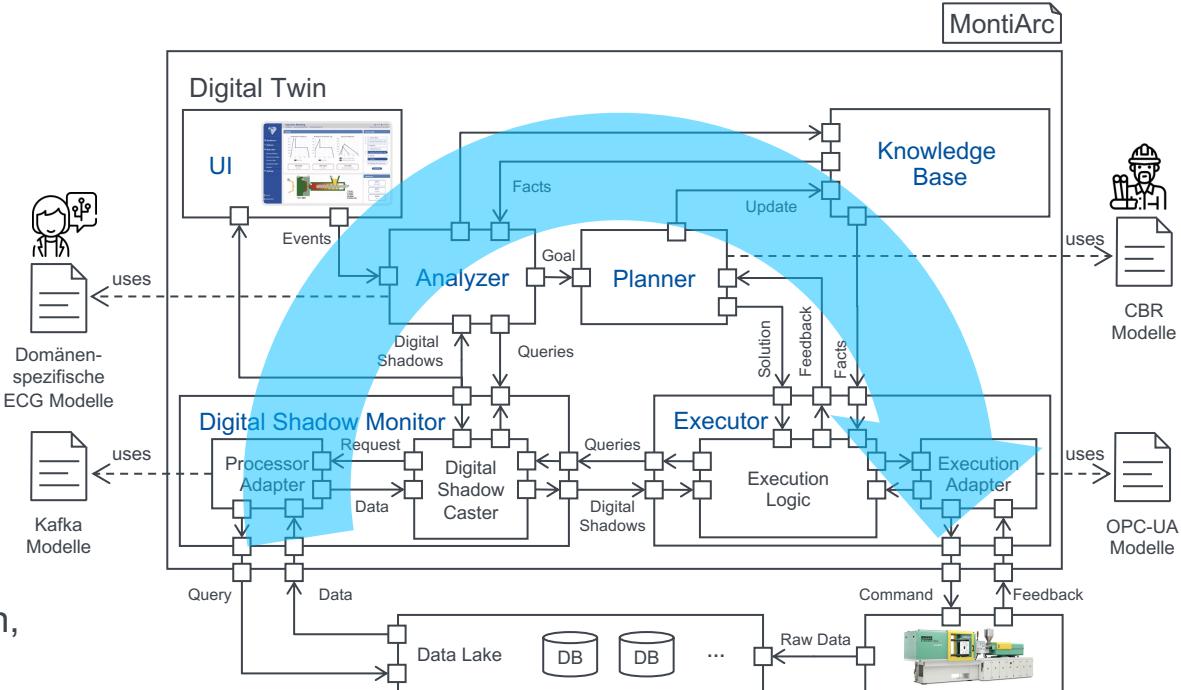


T. Bolender, G. Bürenich, M. Dalibor, B. Rumpe, A. Wortmann: Self-Adaptive Manufacturing with Digital Twins. In: 2021 International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS), pp. 156-166, IEEE Computer Society, 2021.

# Kern-Architektur des Digitalen Zwillings

## Als Modell der MontiArc Architekturbeschreibungssprache

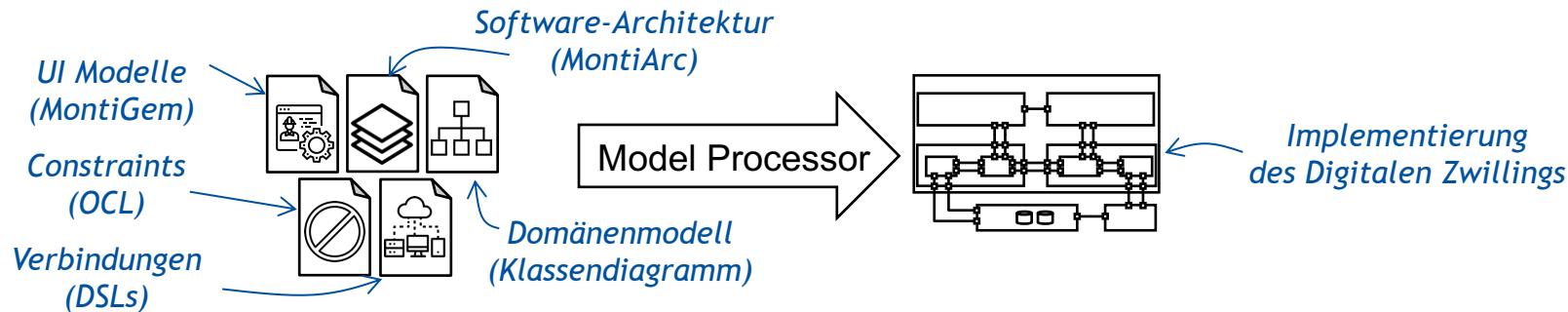
- **Monitor**
  - Beobachte das CPS
  - Erzeuge digitale Schatten
- **Analyze**
  - Finde Probleme und Ziele
- **Plan**
  - Handlungsplanung
- **Execute**
  - Adaptiere CPS
- **Knowledge**
  - Analyseregeln, Handlungen, Modelle, Verbindungen, ...



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.

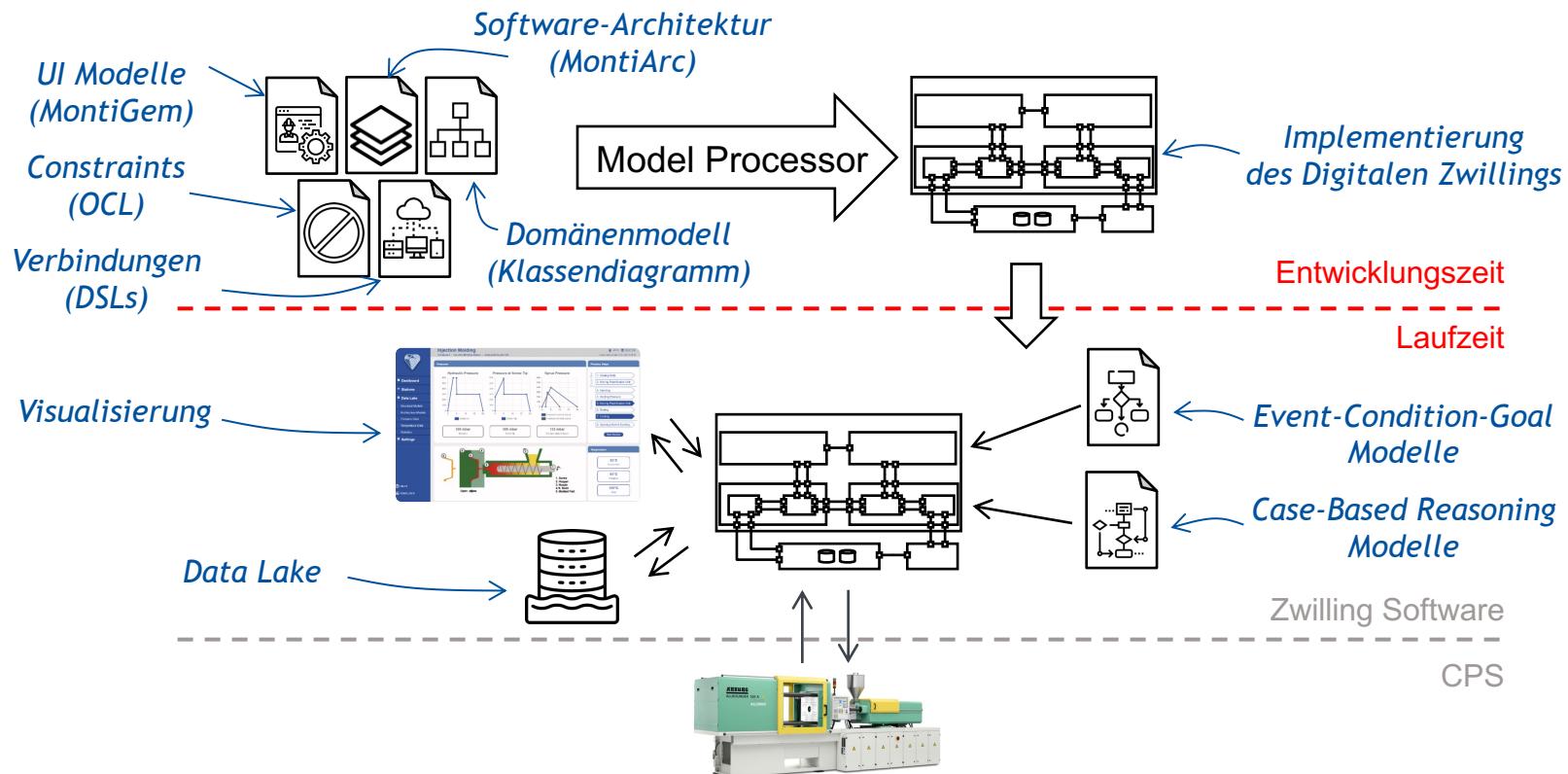
# Schema: Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Software-Experten nutzen geeignete Modellierungstechniken zur Design-Zeit



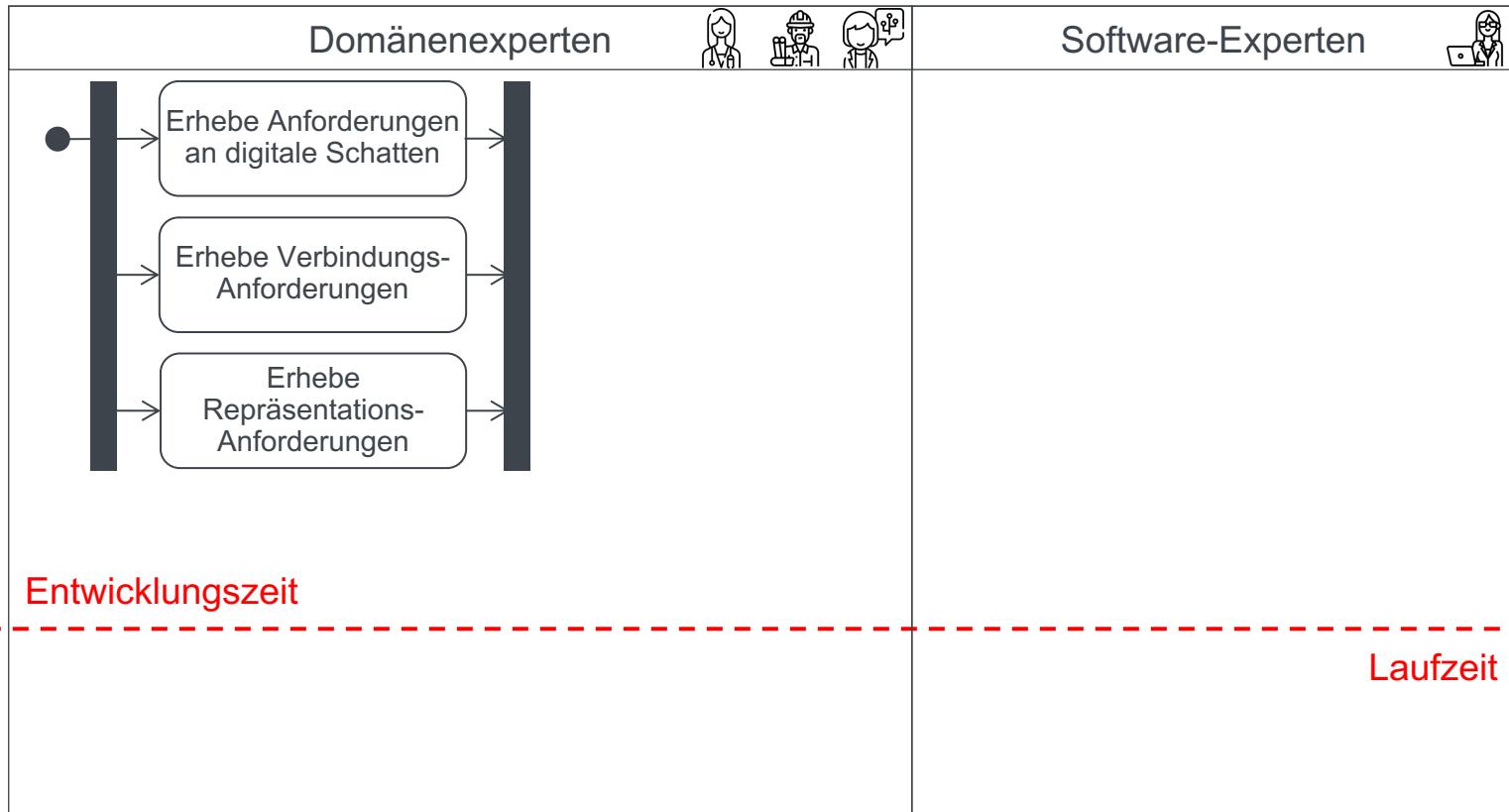
# Schema: Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Domänenexperten konfigurieren und steuern CPS durch geeignete Modelle



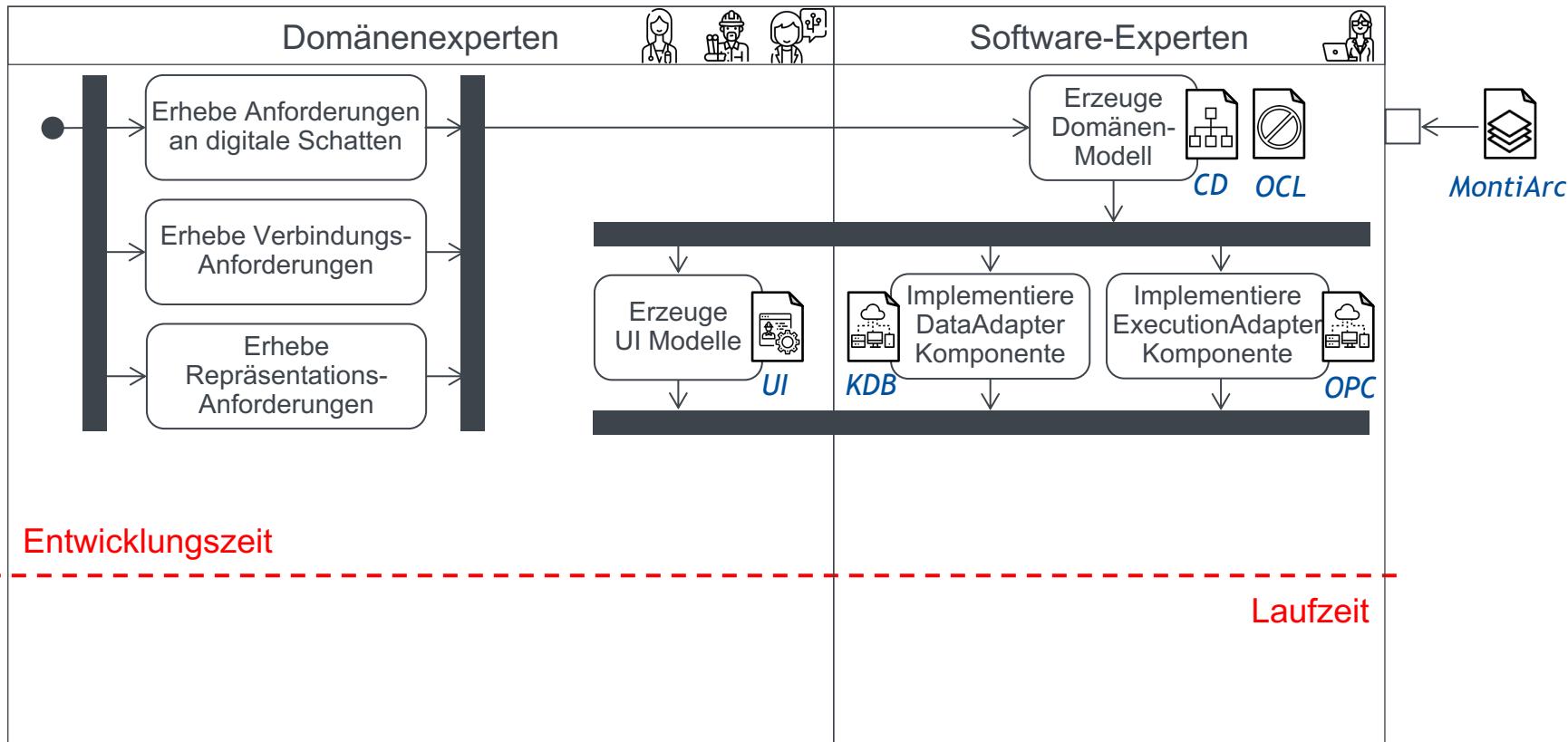
# Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Kooperation von Domänenexperten und Software-Experten



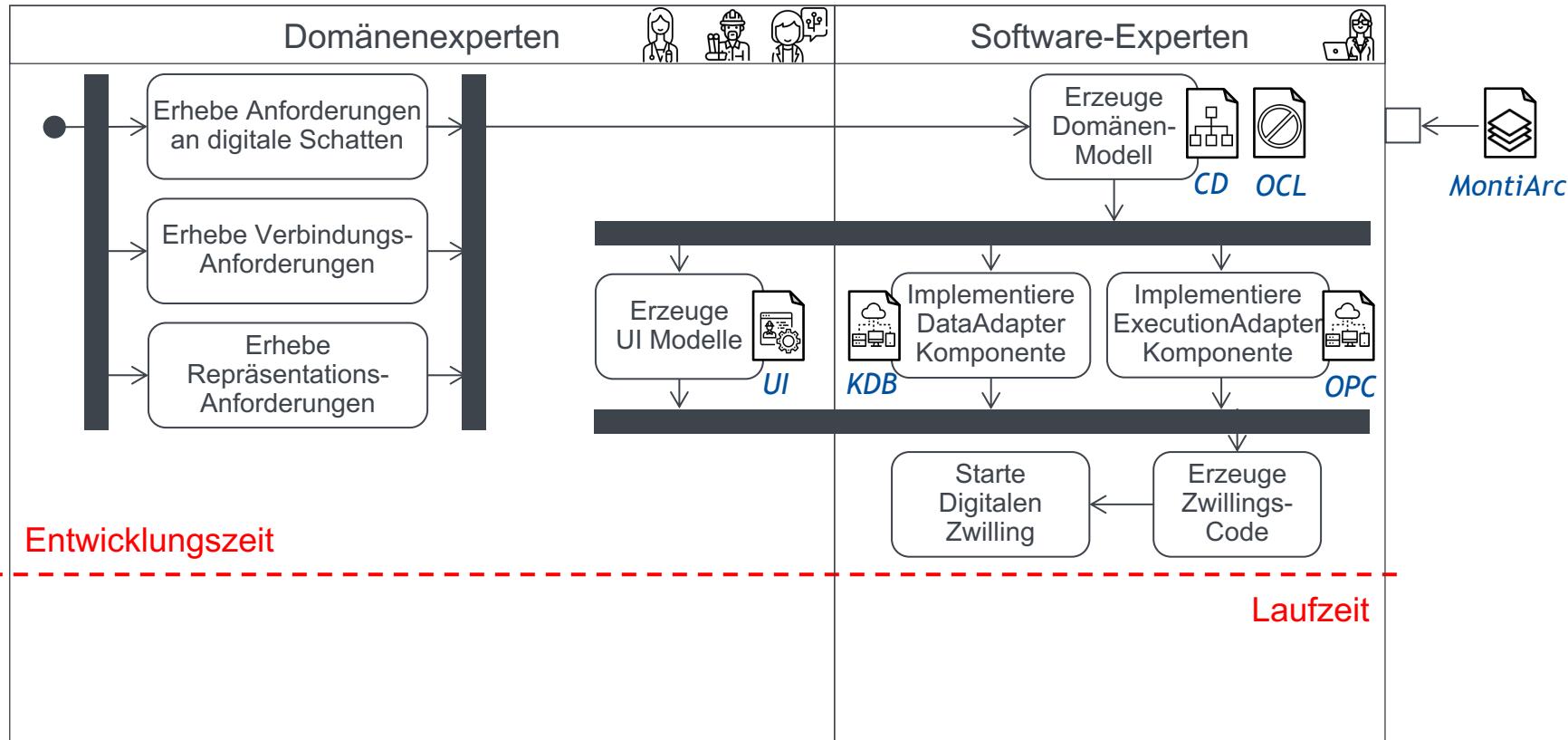
# Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Kooperation von Domänenexperten und Software-Experten



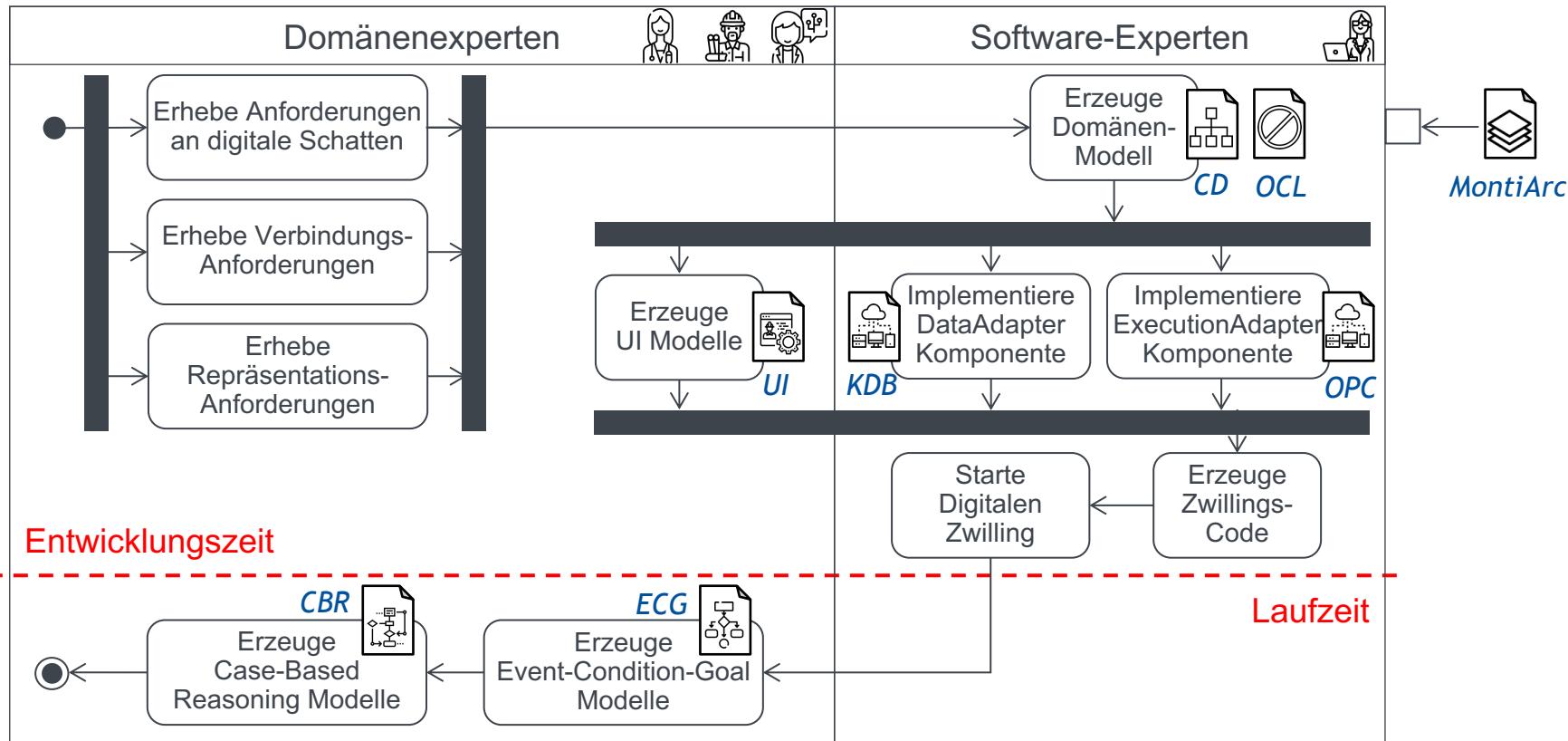
# Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Kooperation von Domänenexperten und Software-Experten



# Modellgetriebene Entwicklung Digitaler Zwillinge

Kooperation von Domänenexperten und Software-Experten

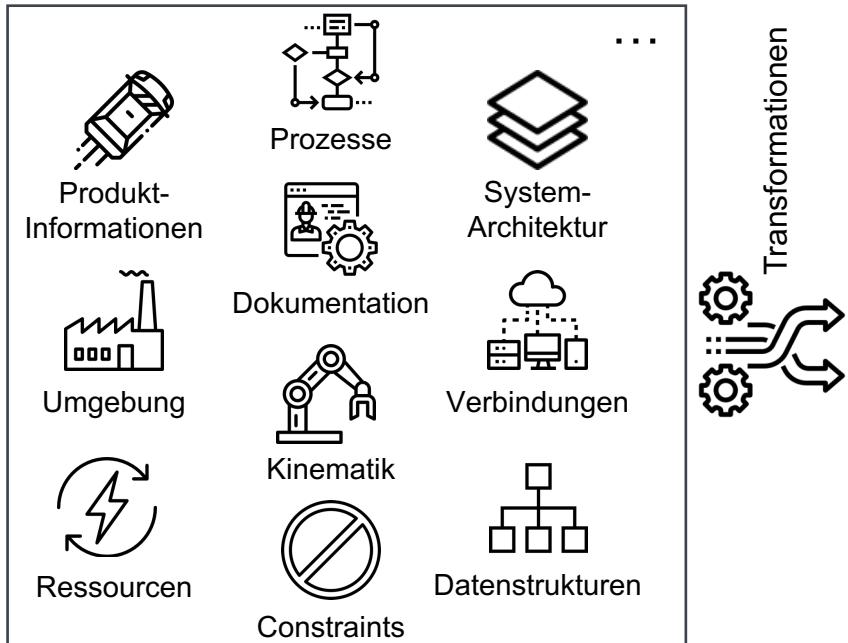


Zusammenfassung IV

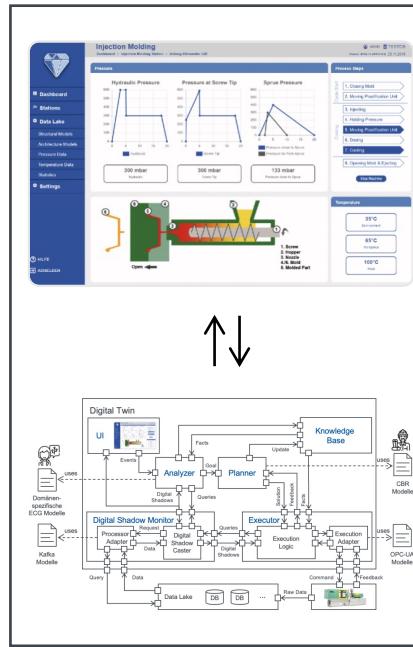
**Die Software-Architektur Digitaler Zwillinge wird aus Modellen generativ erzeugt und interpretiert domänenspezifische Verhaltensmodelle zur Laufzeit.**

# Automatische Synthese der Architekturen Digitaler Zwillinge

## Aus Entwicklungs-, Simulations-, und Softwaremodellen



Entwicklungs-, Simulations-  
und Software-Modelle

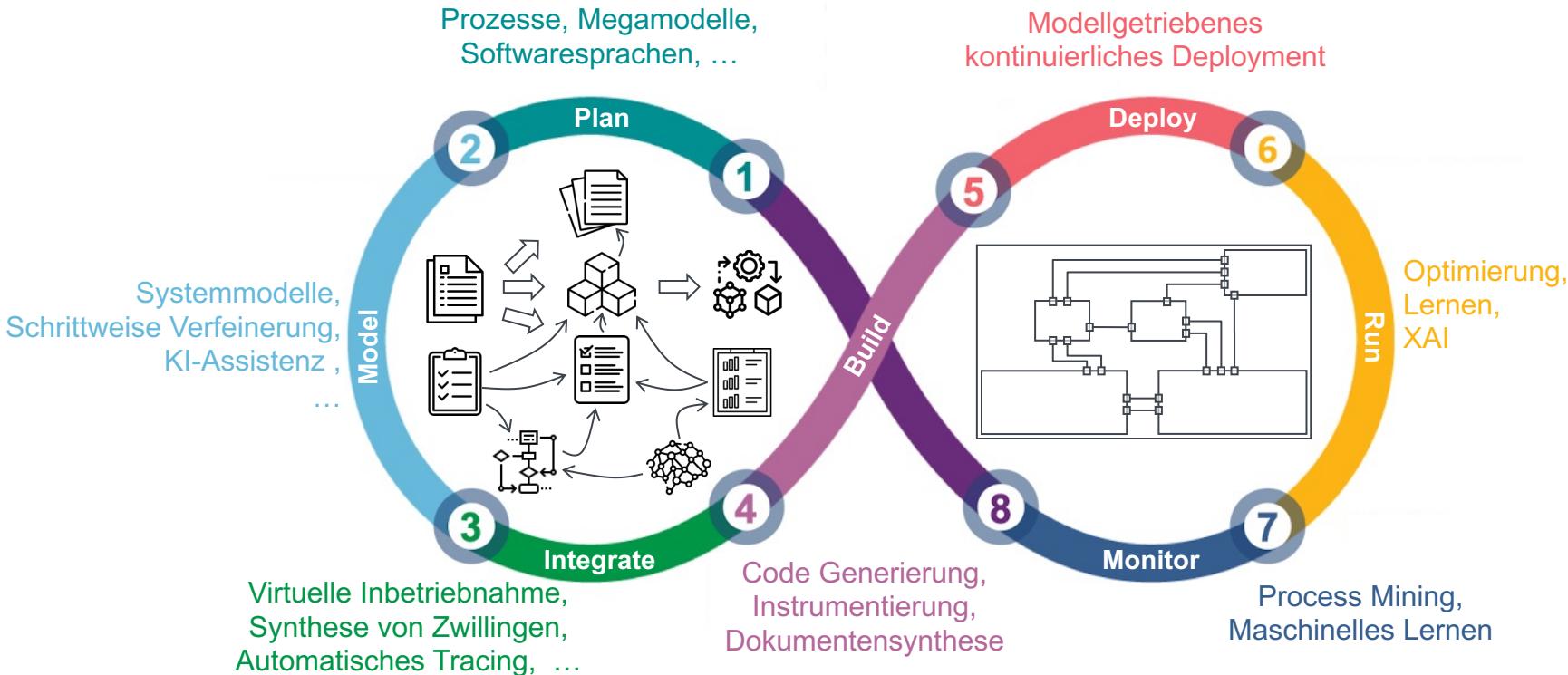


Implementierung des  
Digitalen Zwillings

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

# Digitale Zwillinge als Basis eines modellgetriebenen DevOps

Design-Zeit Systemmodellierung trifft Laufzeit Datenanalyse



# 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**?

---

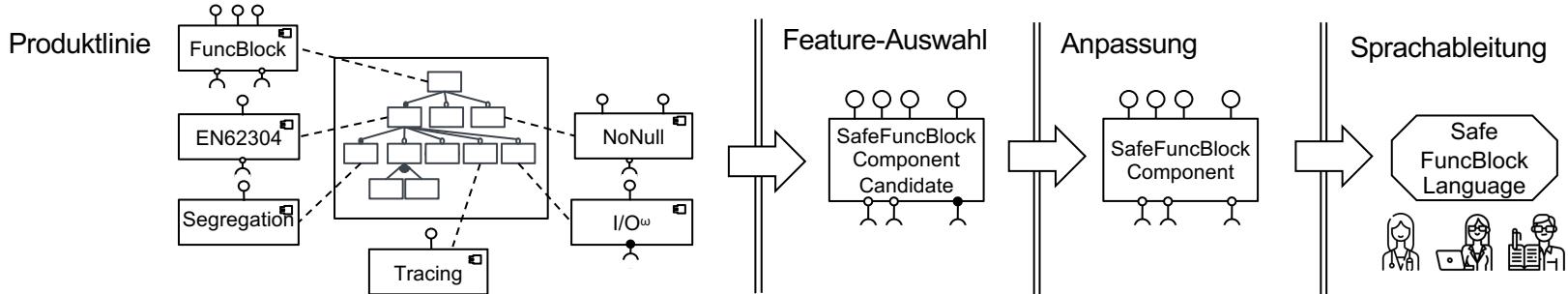
<sup>1</sup> J. Michael, J. Pfeiffer, B. Rumpe, A. Wortmann: Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems. In: 10th IEEE/ACM International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems.

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

# Systematische kompositionale Sprachentwicklung

Überbrückung der konzeptuellen Kluft bedarf spezifischer Software-Sprachen

- Mangel **ganzheitlicher Sprachwiederverwendung** (Syntax & Semantik) behindert Entwicklung echt domänenspezifischer Sprachen
- Neuartige Methodik basierend auf **Sprachkomponenten** in Produktlinien
- Komposition:** Black-Box für Syntax, Grey-Box für Semantik



A. Wortmann: Towards Component-Based Development of Textual Domain-Specific Languages. In: International Conference on Software Engineering Advances (ICSEA 2019), 2019.

A. Butting, J. Pfeiffer, B. Rumpe, A. Wortmann: A Compositional Framework for Systematic Modeling Language Reuse. In: Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS'20), pp. 35-46, ACM, Oct. 2020.

Zusammenfassung I

**Modellgetriebene Software-entwicklung nutzt Modellierungs-sprachen und -Werkzeuge, für effiziente Erzeugung und Betrieb komplexer Software-Systeme.**

Zusammenfassung II

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

Zusammenfassung III

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

Zusammenfassung IV

**Die Software-Architektur Digitaler Zwillinge wird aus Modellen generativ erzeugt und interpretiert domänenspezifische Verhaltensmodelle zur Laufzeit.**

# Aktivitäten in der modellgetriebenen Entwicklung Digitaler Zwillinge

Weiteres unter [www.wortmann.ac/dts](http://www.wortmann.ac/dts)

## SECPPS 2022/2 (Internationale Akademie Traunkirchen, Jun 1-3, 2022)

The first in-presence edition of our workshop takes place in the [International Academy Traunkirchen](#) from June 1-3, 2022. Participants from our mailing list were invited to attend and about 25 people confirmed attendance.

### Agenda

We, 1.6.

- 14:00 – 14:10 Welcome by A. Zoitl, M. Wimmer, A. Wortmann
- 14:10 – 14:30 Introduction Round
- 14:30 – 15:30 Collecting Topics, Pitches for Topics (Barcamp-Style) (Moderator: Jörg Walter)
- 15:30 – 16:00 Coffee and Snacks
- 16:00 – 17:30 Barcamp Round 1
- 17:30 – 18:00 Wrap Up Day 1

Software Engineering für CPPS (SECPPS) Community  
<https://rickrabiser.github.io/secpps-ws/>



**Ceci n'est pas un jumeau numérique**

Andreas Wortmann  
*University of Stuttgart*

Presentation slides

Abstract: Digital Twins are currently investigated as the technological backbone for providing an enhanced understanding and management of existing systems as well as for designing new systems in various domains, e.g., ranging from single manufacturing components, such as sensors to large-scale systems such as smart cities. Given the diverse application domains of Digital Twins, it is not surprising that the characterization of the term Digital Twin, as well as the needs for developing and operating Digital Twins are multifaceted. Providing a better understanding what the commonalities and differences of Digital Twins in different contexts are, may allow to build reusable support for developing, running, and managing Digital Twins by providing dedicated concepts, techniques, and tool support. Yet there is neither commonly accepted definition of the term "Digital Twin", nor agreements about what such a software should comprise or do. This is partly due to the different communities involved in digital twin research and partly due to the different challenges digital twins are applied to. In this talk, we will discuss different perspectives on digital twins, lay out insights on digital twin features based on the largest literature study on digital twins, discuss the interpretation of digital twins by large US platform providers, and illustrate a toolchain for the model-driven engineering of self-adaptive digital twins.

Engineering Digital Twins (EDT) Community  
<http://edt.community>



The GEMOC Initiative

ModDIT 2022 2022, Virtual

Home / Events / ModDIT 2022

2nd International Workshop on Model-Driven Engineering of Digital Twins

ModDIT'22

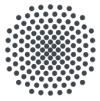
co-located with MODELS 2022

About | Program | Call | Dates | Committees

About the Workshop

Digital twins promise tremendous potential to better understand and make use of cyber-physical systems in automotive, avionics, manufacturing, medicine, and many more domains. Despite many of the twinned systems being developed using models, engineering digital twins currently is ad-hoc and demands integrating different piecemeal technologies, which effectively hinders the application of digital twins. The focus of many digital twins and frameworks is currently on the application and visualization of digital twins, while little research on digital twins has been done on specific implementation, bottom-up or abstractly, how digital twins could be conceived from down. Hence, the gap between both views that only research on model-driven engineering (MDE) can reduce. Hence, MDE is crucial to fully and systematically leverage the potential of digital twins. Currently, a venue bringing together experts from the modeling community on this topic is missing: ModDIT'21 brings together researchers on and developers of digital twins come together to shape the future of systematically designing, engineering, evolving, maintaining, and evaluating digital twins.

Workshop on Model-Driven Engineering of Digital Twins  
<https://gemoc.org/events/moddit2022.html>



**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