

Digitale Zwillinge — Klassifikation und Beispiele

White Paper. Dezember 2023

Prof. Dr. habil. Michael Schreiner
RhySearch
Werdenbergstrasse 4
9471 Buchs
Schweiz
michael.schreiner@rhysearch.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	3
2 Digitale Zwillinge ohne Kommunikation	4
3 Digitale Zwillinge, die Daten vom realen System verarbeiten	6
3.1 Inverse Probleme	6
3.2 Virtuelle Sensoren	7
3.3 Predictive Maintenance	8
4 Digitale Zwillinge mit bidirektionaler Kommunikation mit dem realen System	10
5 Fazit	10
Literatur	11

Zusammenfassung

In vielen technischen Anwendungen kommen digitale Zwillinge zum Einsatz. Deren Definition ist so breit, dass allein durch die Verwendung des Begriffs „digitaler Zwilling“ nicht klar ist, was genau gemeint ist, welche Eigenschaften der Zwilling hat und welche Teile des realen Systems er abbildet. In diesem Paper werden digitale Zwillinge in zweierlei Hinsicht klassifiziert: Einerseits nach der Art der Kommunikation zwischen digitalem Zwilling und der Realität, andererseits nach der Geschwindigkeit, mit der der digitale Zwilling die Realität simuliert. Zahlreiche Beispiele aus der Praxis verdeutlichen die Klassifikation.

1 Einführung

Beim Flug zum Mond von Apollo 13 im Jahr 1970 gab es Schwierigkeiten mit dem Versorgungsmodul, so dass die Mission schon auf dem Hinweg abgebrochen werden musste. Der geänderte Plan sah nun vor, dass die Kapsel mit Versorgungsmodul und angekoppelter Mondlandefähre den Mond umrunden sollte, um dann zur Erde zurückzufliegen. Zunächst war unklar, wie die Steuerdüsen betätigt werden mussten, um diese Flugbahn zu ermöglichen. Was dann geschah, war der vielleicht erste dokumentierte Einsatz eines digitalen Zwillings: Mission Control in Houston ermittelte die aktuelle Position und Geschwindigkeit des Raumschiffs und berechnete für die neue Konfiguration mit angekoppelter Mondfähre einen aktualisierten Kurs zur Erde sowie, wann und wie die Steuerdüsen zur Bahnkorrektur eingesetzt werden müssen. Die Ergebnisse dieser Simulationen, die auf einem der Computer der NASA stattfanden, wurden anschliessend an die Crew der Raumkapsel übermittelt. Das Verfahren hat funktioniert, und die Crew ist sicher auf der Erde gelandet.

Was ist also passiert? Das Verhalten eines Raumschiffs im Gravitationsbereich von Sonne und Mond ist als Berechnungsmodell digital abgelegt, und es fand eine Kommunikation von der Realität zum Programm statt (Position und Geschwindigkeit der Raumfähre). Nach der Berechnung wurden die Anweisungen an das Raumschiff übermittelt.

*Okay, Houston — we've had a problem here.
Jack Swigert*

Darüber hinaus war das System in der Lage, auf unerwartete Anforderungen wie den neuen Kurs oder die neue Masse der Raumfähre mit angedockter Raumfähre zu reagieren. So stellt man sich heute einen digitalen Zwilling vor!

Der Begriff des „digitalen Zwillings“ wurde im Jahr 1970 natürlich noch nicht verwendet. Er wurde erst später in einer NASA-Publikation in einem anderen Zusammenhang erwähnt, und kann in den letzten Jahren recht häufig in Publikationen gefunden werden. Allerdings wird die Bezeichnung „digitaler Zwilling“ nicht einheitlich verwendet. So wird der Begriff im Umfeld von Industrie 4.0 als digitales Abbild eines realen Prozesses verwendet, das als Software parallel mit dem realen System läuft und mit ihm Daten austauscht. Im Umfeld des Industrial Metaverse steht dagegen die Interaktion mit dem Menschen im Vordergrund, und ein reales System wird nicht vorausgesetzt.

Die Gesellschaft für Informatik gibt in ihrem Informatiklexikon, das auf ihrer Webseite zur Verfügung steht, folgende Beschreibung: [1] „Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge wie zum Beispiel Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mittels einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird.“ Es zeigt sich also, dass der Begriff „digitaler Zwilling“ sehr breit verwendet wird. Daher erscheint es sinnvoll, eine Klassifikation vorzunehmen, um besser zu verstehen, was unter einem digitalen Zwilling im jeweiligen Kontext verstanden wird.

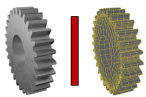
Ziel dieses White Papers ist daher, eine Klassifikation der verschiedenen Ausprägungen von digitalen Zwillingen vorzunehmen und diese mit praktischen Beispielen zu erläutern. Dabei wird ihr Einsatz für Dienste vernachlässigt und der Schwerpunkt auf digitale Zwillinge für physische Objekte gelegt. Zunächst

werden wir die digitalen Zwillinge nach der Art der Kommunikation mit dem realen System klassifizieren. Wir unterscheiden digitale Zwillinge,

- die überhaupt nicht mit einem realen System kommunizieren,
- die Daten von einem realen System erhalten, ohne etwas zurückzuspielen,
- die eine wechselseitige Kommunikation mit einem realen System durchführen.

In der Arbeitsgruppe „Digitaler Zwilling“ von Industrie 2025 [2] wird zum Beispiel die wechselseitige Kommunikation als notwendige Eigenschaft eines digitalen Zwillings beschrieben. Wir folgen hier nicht dieser Definition, sondern beschreiben, wie der Begriff in der Praxis verwendet wird. Neben der Klassifikation bezüglich der Kommunikation unterscheiden wir, ob der digitale Zwilling synchron mit der realen Welt (also in Echtzeit) arbeitet, oder nicht.

2 Digitale Zwillinge ohne Kommunikation



Wir betrachten zunächst den digitalen Zwilling ohne Kommunikation mit einem realen System. Da keine Kommunikation stattfindet, muss kein reales System existieren. Klassische Beispiele sind Simulationsmodelle, wie sie seit Jahren in der Produktentwicklung eingesetzt werden. Dazu gehören Finite-Elemente-Modelle, die beispielsweise das mechanische Verhalten von realen Objekten beschreiben, um deren Funktion vorab zu testen, Grenzen aufzuzeigen und Produktoptimierungen zu ermöglichen. Der Charme dieser Methoden liegt darin, dass sie sehr früh in der Produktentwicklung eingesetzt werden können, um das Design ohne Prototypen zu evaluieren und zu optimieren. Diese digitalen Systeme arbeiten typischerweise nicht in Echtzeit, vielmehr können die Simulationen mitunter lange Rechenzeiten benötigen.

Als Beispiel betrachten wir die Antenne der Raumsonde JUICE [3], die sich vor einiger Zeit auf den Weg zum Jupiter gemacht hat, um die Jupitermonde, auf denen Eis vermutet wird, zu untersuchen. Als Radar besitzt die Raumsonde eine 16m lange Dipolantenne, die einen Ausklappmechanismus benötigt. Die Design-Idee der Firma Space-Tech ist eine Kombination von Kohlefaserrohren, die durch Aussparungen in der Mitte umklappen können. Im eingeklappten Zustand sind sie wie eine Feder gespannt und können dann im Weltraum ohne Energieeinsatz ausklappen. Diese Konstruktion zeichnet sich durch ein extrem geringes Gewicht, die Integration des elektrischen Leiters in den mechanischen Aufbau sowie den energiesparenden Klappmechanismus aus. Mit mechanischen Simulationen kann das dynamische Verhalten des Systems analysiert und das Design der Aussparungen im Hinblick auf die mechanischen Spannungen optimiert werden. An diesen Stellen ist die Gefahr, dass sich Risse bilden, am grössten. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse einer mechanischen Simulation des Gelenks im Rohr.

Intelligent digital twins are changing how businesses operate, how they collaborate and how they innovate – and enterprises that get left behind will struggle to participate in the markets and ecosystems of the future.
Accenture Tech Vision Report 2021

Ein weiteres Beispiel für einen digitalen Zwilling ohne Kommunikation sind Flugsimulatoren, mit denen Piloten das Fliegen von Passagiermaschinen erlernen. Das physikalische Verhalten eines Flugzeugs

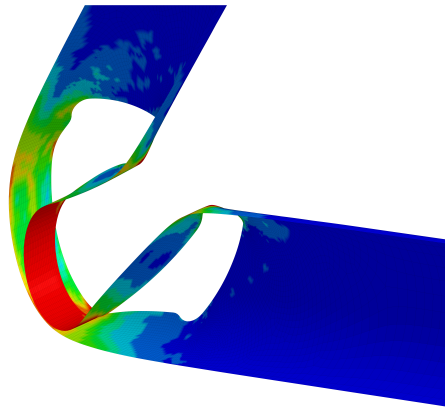


Abbildung 1: Simulation der klappbaren Antenne (halbes Modell) von JUICE. Darstellung der von-Mises-Spannung.

wird in Echtzeit simuliert und reagiert auf die Interaktionen des Piloten. Diese Flugsimulatoren sind heute Standard in der Pilotenausbildung. Grosse Teile des Cockpits werden sehr detailreich nachgebaut, was diese Flugsimulatoren recht teuer macht.



Abbildung 2: Virtuelle Lernumgebung mit einer Schleifmaschine der Reishauer AG.

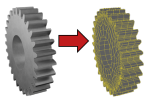
Einen anderen Weg des Lernens mit einem digitalen Zwilling hat die Reishauer AG mit der ETH und RhySearch zusammen besprochen [4]. In einer VR-Brille ist eine Schleifmaschine von Reishauer als virtuelles Modell dargestellt. In das Simulationsmodell ist sogar die Steuerungssoftware der Schleifmaschine integriert, so dass sich das virtuelle Modell wie in der Realität verhält. Damit kann der Anwender den Umgang mit der Maschine erlernen. Dazu muss keine reale Maschine bereitgestellt werden, der Nutzer kann an jedem Ort üben, und es ist möglich, mehrere Instanzen zum Üben anzubieten. So ist ein kostengünstiges Lernen möglich, bei dem auch anspruchsvolle Szenarien ohne Gefahr für die Maschine geübt werden können. Abbildung 2 vermittelt einen Eindruck von der Lernumgebung.

In most of these presentations, the words Digital Twin can be easily replaced by something that is more thoughtful and pragmatic such as model, information, simulation, etc.

Oleg Shilovitsky

Als letztes Beispiel für digitale Zwillinge ohne Kommunikation mit dem realen System werden hier die Modelle im industriellen Metaverse [5] erwähnt. Dabei handelt es sich um Modelle von Systemen mit realer Grafikdarstellung, die mit dem Anwender, der typischerweise eine VR-Brille trägt, interagieren. So kann sich ein Mensch im Produktionsumfeld mit Robotern bewegen, man kann die Kooperation zwischen Mensch und Maschine optimieren oder das Verhalten der automatischen Roboter in Anwesenheit von Menschen testen. Es ist offensichtlich, dass die Modelle in diesem Szenario in Echtzeit arbeiten. Im Industriellen Metaverse steht die Interaktion von digitalen Zwillingen mit Menschen im Vordergrund und nicht die Kommunikation mit dem realen System.

3 Digitale Zwillinge, die Daten vom realen System verarbeiten



Nun diskutieren wir digitale Zwillinge, die Informationen vom realen System empfangen, aber keinen Kommunikationskanal zurück zum System aufbauen. Im Folgenden werden drei typische Anwendungsfelder betrachtet:

- Inverse Probleme
- Virtuelle Sensoren
- Predictive Maintenance

3.1 Inverse Probleme

Der aus der Mathematik stammende Begriff „Inverses Problem“ beschreibt Aufgaben, bei denen Daten in der Realität gemessen werden und versucht wird, Informationen über die Ursachen der Daten zu ermitteln [6]. Das Ziel der gesamten Analyse sind also das Erforschen der Ursachen. Diese abstrakte Beschreibung soll mit einem bekannten Beispiel verdeutlicht werden: Bei Ultraschalluntersuchungen in der Medizin werden Schallwellen in den Körper eingeleitet, die an den Grenzen zwischen Gewebe und Organen zum Teil reflektiert werden. Der andere Teil der Wellen wandert weiter, bis sie eine weitere Grenzfläche erreichen. Der Schallkopf misst die reflektierten Schallwellen. Bei dieser Messmethode wird die Zeit bestimmt, die die Schallwellen benötigen, um das Gewebe zu durchlaufen. Der genaue Weg, den die Schallwellen im Gewebe zurückgelegt haben, ist zunächst unbekannt. Nun kommt die Mathematik ins Spiel: In einem Simulationsmodell wird versucht, Organe und Gewebe so zu positionieren, dass die Laufzeiten des simulierten Ultraschalls den gemessenen Laufzeiten entsprechen. Das Ergebnis, also die ermittelten Organ- und Gewebegrenzen, wird dann dem Arzt während der Untersuchung am Monitor angezeigt. Der digitale Zwilling simuliert also die Ausbreitung des Ultraschalls mit seinen Reflexionen. Die ärztliche Untersuchung geht sehr schnell, der digitale Zwilling arbeitet also in Echtzeit.

In practice, digital twins can help organizations create more agile operations, mitigate future risks and remain competitive in an increasingly complex and unpredictable business environment.
Accenture

Es gibt auch eine grosse und langsame Variante dieses Prinzips: Seismische Messungen. Das Ziel dabei ist es, Schichtgrenzen von Gesteinen in der Erde aufzuspüren, um zum Beispiel Lagerstätten von Bodenschätzen aufzufinden, oder zu erkennen, ob der Untergrund für ein Geothermie-Kraftwerk geeignet ist. Das Prinzip ist ähnlich wie in der Medizin: Schallwellen werden an verschiedenen Stellen eingebracht, indem grosse Rüttelplatten, die an einem Lastkraftwagen angebaut sind, Vibrationen erzeugen. Gemessen wird der Schall mit zahlreichen Geophonen, die an verschiedenen Positionen angebracht sind. Solch eine Untersuchung deckt typischerweise mehrere km^2 ab und dauert auch einige Wochen. Die Auswertung, also die Lösung des inversen Problems ist aufwendig und benötigt oft mehrere Monate. Abbildung 3 zeigt ein Untergrundmodell, wie es zum Beispiel für Simulationen des seismischen Verhaltens verwendet wird.

Digital Twin is a cool name. I hope you agree. And I like this name. Unfortunately, marketing did their job well and created a glorified definition and campaigns about Digital Twin that is very confusing.

Oleg Shilovitsky

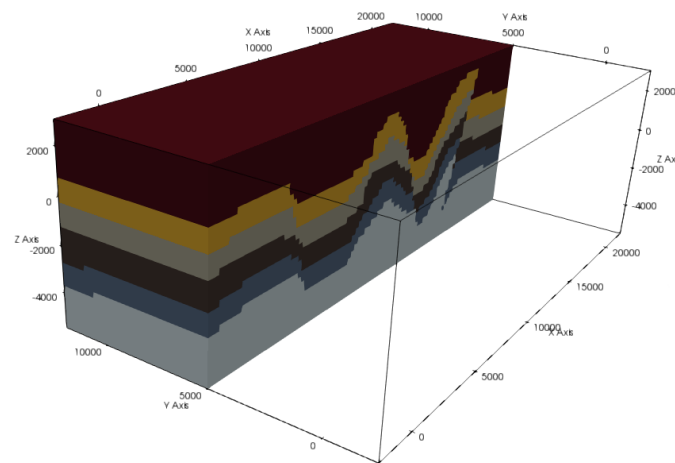


Abbildung 3: Untergrundmodell. Mit seismischen Methoden wird versucht, Informationen über den Untergrund zu gewinnen.

3.2 Virtuelle Sensoren

Von virtuellen Sensoren spricht man, wenn an einem System eine Grösse gemessen wird, um mit dieser Grösse eine andere Eigenschaft zu bestimmen. Dazu ist ein Modell notwendig, um von der direkt gemessenen auf die gewünschte Grösse schliessen zu können. Je nach Komplexität der Aufgabe, wird hierzu ein digitaler Zwilling eingesetzt.

Ein sehr einfaches (fast triviales) Beispiel ist ein Thermistor, der zur Messung von Temperaturen eingesetzt wird. Er besteht aus einem Leiter, der seinen elektrischen Widerstand abhängig von der Temperatur ändert. Durch die Messungen von elektrischen Grössen wird auf die Temperatur geschlossen. Grundlage dafür ist eine Kennlinie, die das elektrische Verhalten mit dem thermischen verbindet. Man könnte nun diese Situation mit der Verwendung einer Kennlinie, wie sie in der Messtechnik Standard ist, einen digitalen Zwilling nennen. Dies ist unüblich, es zeigt aber, dass die oben zitierte Definition des digitalen Zwillings so breit ist, dass sie auch diese Fälle abdecken könnte.

Ein besseres Beispiel für einen virtuellen Sensor ist der Hot-Disk-Sensor [7], der verwendet wird, um die Wärmekapazität und die Wärmeleitungseigenschaften von Materialien zu bestimmen. Das Funktionsprinzip (Abbildung 4) kann folgendermassen beschrieben werden: Durch Strom in einem Leiter, der zwischen zwei Proben geklemmt wird, werden der Leiter und durch die Wärmeleitung auch die Probe erwärmt. Der spezifische ohmsche Widerstand des Leiters hängt von seiner Temperatur ab, so dass man durch elektrische Messgrössen indirekt die Temperatur am Sensor messen kann. In der Mitte der Probe befindet sich also eine Heizung mit bekannter Leistung, gleichzeitig gelingt es, die Temperatur an der Probe zu messen. Der zeitliche Verlauf der Temperatur kann nun analysiert und daraus auf die Materialeigenschaften der Probe geschlossen werden. Grundlage hierfür ist ein grosses Verständnis, wie sich die Wärme in der Probe in Abhängigkeit der Materialparameter ausbreitet. Aktuell arbeiten wir bei RhySearch daran, diesen digitalen Zwilling zu verbessern, so dass auch anisotrope Materialeigenschaften gemessen werden können [8].



Abbildung 4: Hot-Disk-Sensor. Links sieht man den Sensor, der zwischen zwei Proben eingeklemmt ist, rechts Detailaufnahmen des Sensors.

3.3 Predictive Maintenance

Eine häufig propagierte Anwendung von digitalen Zwillingen ist Predictive Maintenance. Hier geht es darum, die Lebensdauer von Bauteilen bzw. Systemen vorherzusagen, um den optimalen Zeitpunkt für Wartungsarbeiten zu bestimmen. Die Entwicklung von datenbezogenen digitalen Zwillingen ist für diesen Zweck sehr anspruchsvoll:

- In der Praxis werden die Maschinen in der Regel nicht bis zum Versagen einer Komponente betrieben. Daher liegen oft keine oder nur sehr wenige Messdaten der Maschine vor, wenn diese kurz vor dem Versagen steht.
- Der Output des digitalen Zwillings ist von statistischer Natur. Um die Qualität des digitalen Zwillings bestimmen zu können, muss das System so gut verstanden werden, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall einer Komponente beschrieben werden kann, wenn der digitale Zwilling die Wartung empfiehlt. Mit anderen Worten, man benötigt die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen Ausfall, unter der Annahme, dass der digitale Zwilling die Wartung empfiehlt.

Still, digital twins are more than just an evolution of digital models, although their goal is similar: Higher quality products and better product support at less cost and less effort.

Michael Park

Durch diese Schwierigkeiten ist die Entwicklung von datenbezogenen Predictive-Maintenance-Systemen sehr anspruchsvoll und aufwändig.

Wie die Kombination von physikalischen Simulationen und Experimenten für Predictive Maintenance gelingen kann, soll an folgendem Beispiel beschrieben werden: Zur Vorhersage der Lebensdauer von mechanisch beanspruchten Bauteilen, die einer dynamischen Belastung ausgesetzt sind, interessiert man sich für die im Bauteil auftretenden mechanischen Spannungen und deren zeitlichen Entwicklung. Oft kennt man die kritischen Stellen am Bauteil, kann dort jedoch keine Messungen von Spannungen oder Dehnungen vornehmen. Es ist lediglich möglich, die Verschiebungen oder Dehnungen an anderen Stellen der Struktur zu messen. Nun hilft ein Finite-Elemente-Modell, das das Verhalten des Bauteils simuliert. Man gibt die gemessenen Verschiebungen oder Dehnungen im Simulationsmodell vor, berechnet daraus den Spannungsverlauf an den kritischen Stellen und schätzt dadurch die verbleibende Lebensdauer ab. Zum Abschätzen der Lebensdauer verwendet man typischerweise Resultate aus Schwingungsversuchen für Materialien, mit denen man die Wöhlerlinie berechnet hat [9]. In Abbildung 5 ist eine Situation an einem generischen Fall illustriert.

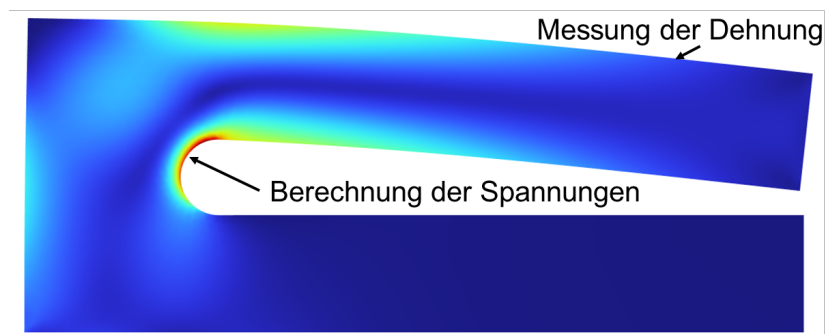
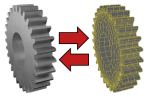


Abbildung 5: Um Informationen über den Spannungsverlauf links zu erhalten, werden Messungen von Dehnungen an anderer Stelle aufgenommen. Der digitale Zwilling ist mit einem Finite-Elemente-Modell in der Lage, aus dem Verlauf der gemessenen Dehnungen auf die Spannungen an der kritischen Stelle zu schließen.

Oft ist es gewünscht, dass diese Simulation parallel zur realen Situation abläuft. Hierfür kann es dann notwendig sein, dass man nicht das vollständige Simulationsmodell berechnet, sondern ein sogenanntes reduziertes Modell. Für die Modellreduktion [10] gibt es im linearen Fall die klassischen Methoden der Modell-Order-Reduction (MOR), die oft auch schon in der Finite-Elemente-Software integriert ist. Anspruchsvoller ist die Situation in der nicht-linearen Situation, zum Beispiel bei komplexem Materialverhalten, oder wenn ein sogenanntes Kontaktproblem vorliegt, wo sich Bauteile berühren. Für diesen Fall muss von Fall zu Fall mit spezifischen Methoden gearbeitet werden. Ein neuerer Trend ist, für diese Probleme Methoden der künstlichen Intelligenz einzusetzen. Dazu trainiert man die neuronalen Netze vorab mit den unterschiedlichsten Situationen (oft auch mit Ergebnissen aus Simulationsprogrammen), um sie dann im Betrieb in Echtzeit auswerten zu können. Oder man inkludiert physikalische Prinzipien in das Training von neuronalen Netzen. Diese „physics informed neural networks“ sind noch Gegenstand aktueller Forschung [11].

Mechanics is the paradise of the mathematical sciences because by means of it one comes to the fruits of mathematics.
Leonardo da Vinci

4 Digitale Zwillinge mit bidirektionaler Kommunikation mit dem realen System



Digitale Zwillinge mit bidirektionaler Kommunikation zum realen System funktionieren natürlich nur, wenn die digitalen Zwillinge in Echtzeit arbeiten können. Die Grundidee in dieser Kategorie ist, dass reale Systeme Daten an den digitalen Zwilling liefern, dort Berechnungen durchgeführt werden, und diese Daten an das reale System zurückgespielt werden.

Ein grosses Anwendungsfeld dieser Technologie ist die „modellbasierte Regelung“. In diesem Ansatz werden die Daten des digitalen Zwillings verwendet, um das reale System zu beeinflussen. Dies geht weit über das hinaus, was mit „klassischer“ Regelungstechnik realisiert werden kann. Dadurch, dass der digitale Zwilling das reale Verhalten in vielen Facetten abbildet, stehen dem Regler viele Informationen zur Verfügung, mit denen er eine bessere Regelung realisieren kann.

While there are multiple ways of solving these problems, the use of „digital twins“ is gaining traction.

Accenture

Ein schönes Beispiel dazu findet man in aktuellen Kaffeemaschinen: Für die Qualität des Kaffees ist es entscheidend, welche Temperatur das Wasser hat, wenn es durch das Kaffeepulver gepresst wird. Aus technischen Gründen wird die Temperatur des Wassers aber nicht beim Kaffeepulver gemessen, sondern viel weiter vorne im System in der Nähe von Wassertank und Pumpe. Es ist nicht so einfach, von der Wassertemperatur an der Pumpe auf die Temperatur des Wassers beim Kaffee zu schliessen. Relevant hierfür ist zum Beispiel, ob die Maschine schon vorgeheizt ist, ob unmittelbar davor schon ein Kaffee zubereitet wurde, wie hoch die Raumtemperatur ist, mit welcher Leistung der Heizblock arbeitet und vieles mehr. Die Aufgabe des digitalen Zwillings besteht also darin, aus der Messung der Wassertemperatur an der Pumpe, dem Betrieb der Pumpe und dem Einsatz des Heizblocks die Temperatur des Wassers beim Kaffee zu schätzen, um den Heizblock der Maschine optimal zu regeln. Dazu bildet der digitale Zwilling relevante Aspekte der Realität ab und simuliert das Verhalten in Echtzeit, also parallel zur Realität.

Andere Beispiele für den Einsatz von digitalen Zwillingen findet man bei Fertigungsmaschinen. Ihre Erwärmung im Betrieb kann zu thermischen Dehnungen führen, die die Bearbeitungsqualität negativ beeinflussen. Das kann kompensiert werden, wenn nicht nur die Temperatur bekannt ist, sondern auch die mechanische Situation zusammen mit ihrem Verzug in einem digitalen Zwilling abgebildet werden kann. Dies ist ein aktuelles Forschungsthema, das wir bei RhySearch bearbeiten.

5 Fazit

Der Begriff „digitaler Zwilling“ wird in der Praxis nicht einheitlich verwendet, so dass es oft nicht erkennbar ist, welche Aspekte der Realität vom digitalen Zwilling abgebildet werden. In diesem Paper wird eine Klassifikation verschiedener digitaler Zwillinge hinsichtlich zweier Aspekte durchgeführt. Wir unterscheiden nach der Art der Kommunikation und nach der Geschwindigkeit, mit der der digitale Zwilling Aspekte der Realität simuliert. Mit der Verbindung von physik-basierten Simulationsmethoden mit Methoden aus der künstlichen Intelligenz werden digitale Zwillinge in Zukunft in vielen weiteren Anwendungen zu finden sein. Man darf gespannt sein, was die Zukunft bringt.

Literatur

- [1] <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling/>
- [2] <https://www.industrie2025.ch/wissen-industrie-40/arbeitsgruppen/digitaler-zwilling>
- [3] https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice
- [4] Holzwarth, V., Hirt, C., Gisler, J., Kunz, A. (2022). Virtual Reality Extension for Digital Twins of Machine Tools. In: West, S., Meierhofer, J., Mangla, U. (eds) Smart Services Summit. Progress in IS. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97042-0_8
- [5] <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/industrial-metaverse-fakt-oder-fiktion.html>
- [6] Nashed, Z., Scherzer, O. (2002) Inverse Problems, Image Analysis, and Medical Imaging: AMS Special Session on Interaction of Inverse Problems and Image Analysis, January 10-13, 2001, New Orleans, Louisiana
- [7] Bohac, V., Gustavsson, M.K., Kubicar, L., Gustafsson, S.E. (2000) Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer. Rev. Sci. Instrum. 71, 2452–2455 (2000), <https://doi.org/10.1063/1.1150635>
- [8] Schreiner, M., Wolfer, C. (2023) Extending the Usability of the Hot-Disk Sensor for Anisotropic Materials. In preparation.
- [9] DIN 50100:2022-12 (2022) Schwingfestigkeitsversuch — Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile <https://dx.doi.org/10.31030/3337109>
- [10] Kumar, R., Ezhilarasi, D. (2023) A state-of-the-art survey of model order reduction techniques for large-scale coupled dynamical systems. Int. J. Dynam. Control 11, 900–916 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40435-022-00985-7>
- [11] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. (2017) Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. arXiv:1711.10561