

Digitale Zwillinge als Wettbewerbsfaktor – Was den Mittelstand ausbremst

Whitepaper

Autoren: Michel Fett & Richard Breimann

Veröffentlichungsdatum: 04.02.2026

*F&B-Engineering GmbH
Schepp Allee 7
64295 Darmstadt*



1 Einleitung

Digitale Zwillinge von Maschinen und Anlagen nehmen im deutschen Mittelstand eine zunehmend wichtige Rolle ein. Vereinzelte Akteure bezeichnen bereits CAD- oder Simulationsmodelle als Digitale Zwillinge. Allerdings legen mehrere ISO-Definitionen nahe, dass ein Digitaler Zwilling immer an ein individuelles und physisch existierendes Produkt gekoppelt ist [2,3]. Dabei wird ausgewähltes Verhalten und Zustände des Produktes, hier auch Physischer Zwilling genannt, in Berechnungs- und Simulationsmodellen hinterlegt. Anschließend werden Echtzeit-Daten des Produktes genutzt, um damit ebendieses Verhalten zu simulieren und Rückschlüsse sowie Vorhersagen zu treffen [2–5].

Hersteller, Verkäufer und Nutzer von Maschinen und Anlagen können gleichermaßen von Digitalen Zwillingen profitieren. Mögliche Nutzenpotentiale können Zustandsüberwachung und prädiktive Wartung sein, aber auch eine Analyse und Optimierung der Performance im Regelbetrieb ist möglich. Trotz dieser und weiterer Nutzenpotentiale sind Digitale Zwillinge noch nicht im Mainstream angekommen.

Im Rahmen der Tätigkeit der Autoren am Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der TU Darmstadt wurde dies näher untersucht [1,6–8]. Der vorliegende Bericht greift dabei erkannte Herausforderungen und Handlungsoptionen auf und fasst diese zusammen.

2 Vom akademischen Forschungsthema hin zur industriellen Digitalisierung

Digitale Zwillinge sind seit längerer Zeit ein prominenter Gegenstand akademischer Forschung. Hinsichtlich der realen, praktischen Anwendung hat das Marktforschungsunternehmen Gartner Inc. Digitale Zwillinge allerdings noch 2018 in ihrem Gartner Hype Cycle auf dem "Gipfel der überzogenen Erwartungen" platziert [9]. In den darauffolgenden Jahren wird das Konzept sowie zugehörige Technologien weiterentwickelt und ausgereift. In einer erneuten Beurteilung im Jahr 2025 sortiert die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) e.V. den aktuellen Stand Digitaler Zwillinge auf dem "Pfad der Erleuchtung" ein [10]. Diese Phase stellt einen Übergangspunkt von theoretischem Konstrukt in die praktische Anwendung dar. In dieser Phase verlagert sich der Fokus zunehmend von der grundsätzlichen Machbarkeit hin zu methodischen Fragen der Umsetzung, Integration und wirtschaftlichen Bewertung. Digitale Zwillinge werden in ersten praktischen

Projekten erfolgreich angewandt, sind allerdings noch nicht im breiten Mainstream angekommen. Der anstehende Übergang zum Mainstream wird sowohl von Gartner Inc. sowie der FVA e.V. auch in deren jeweiligen Trend-Radaren abgebildet. Sie raten Unternehmen daher, zeitnah zu handeln und auf den Trend zu reagieren [10,11].

Während dieser gesamten Entwicklung der letzten Jahre hat die Thematik Digitaler Zwillinge auch ein zunehmendes öffentliches Interesse generiert. Dies kann unter anderem daran festgemacht werden, dass seit 2016/17 die jährlichen Google-Suchanfragen sowohl in Deutschland, aber auch weltweit exponentiell zunehmen [12]. Die zunehmende Relevanz und der Kippunkt vom akademischen Forschungsthema hin zur industriellen Digitalisierung wird auch von mehreren Marktanalyseunternehmen aufgegriffen. Diese prognostizieren, dass die Marktröße Digitaler Zwillinge in den kommenden Jahren exponentiell wachsen wird und 2033 rund 350 Milliarden US-Dollar umfassen wird [13–16].

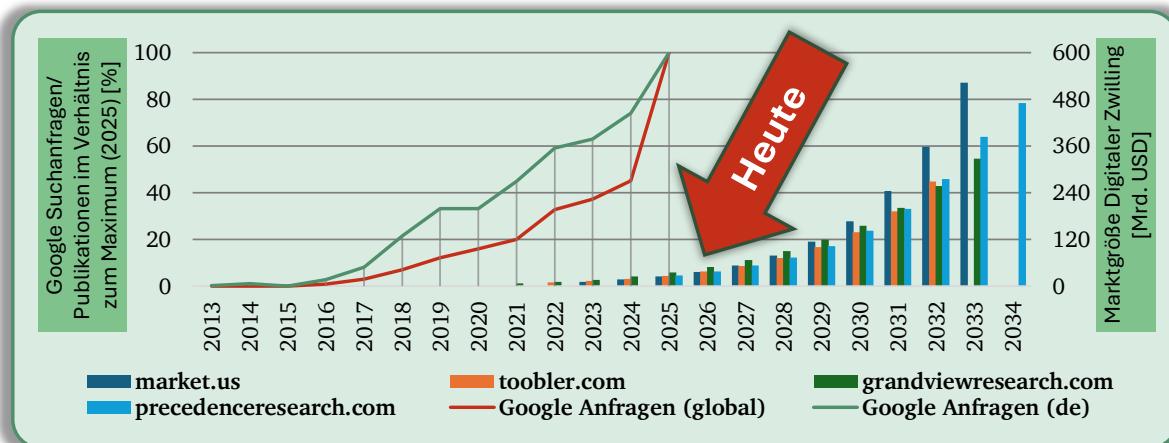


Abbildung 1 - Zeitlicher Verlauf der Aufmerksamkeit, sowie des prognostizierten Marktwachstums Digitaler Zwillinge, in Anlehnung an [1]

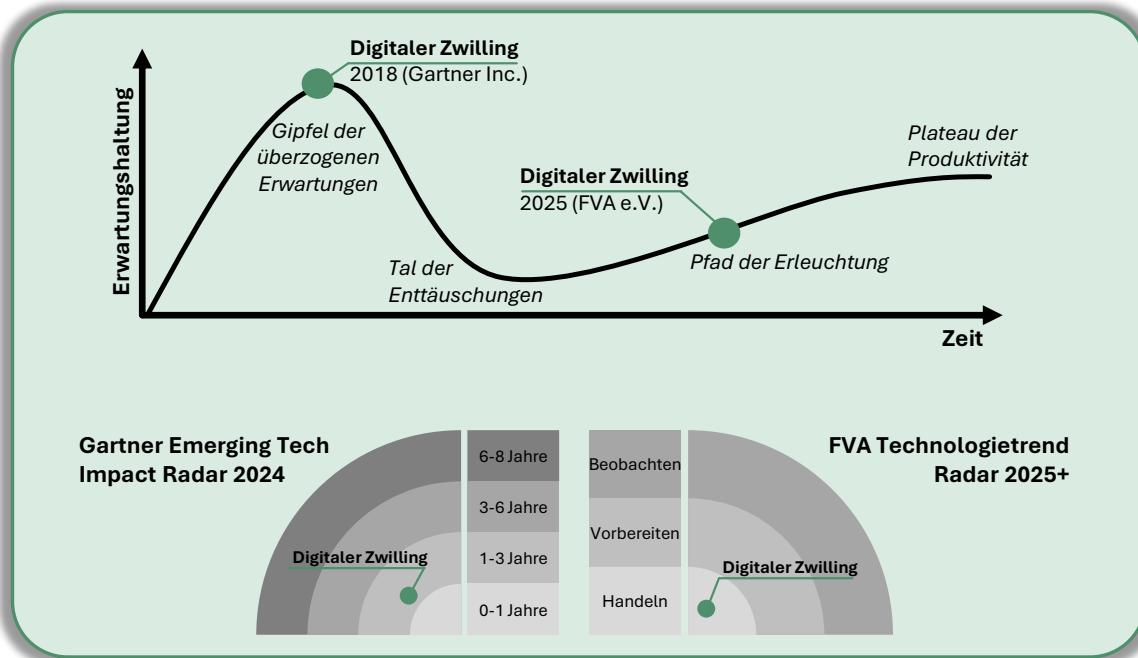


Abbildung 2 – Der Digitale Zwilling im Gartner Hype Cycle und den Gartner- sowie FVA-Trend-Radaren, in Anlehnung an [1,9-11]

3 Schlüssel-Herausforderungen Digitaler Zwillinge

Die Einführung Digitaler Zwillinge geht mit zahlreichen Herausforderungen und Hürden einher. Um diese quantifiziert zu erfassen und statistisch belastbar zu interpretieren, wurden am pmd der TU Darmstadt im Rahmen zweier Vorarbeiten Umfragen zum Thema Digitaler Zwillinge bzw. Digitalisierung durchgeführt [6,8]. In der Literatur finden sich weitere Umfragen anderer Autoren, diese wurden im Rahmen einer dritten Vorarbeit aufgegriffen und miteinander verglichen [7]. Die verschiedenen untersuchten Umfragen nutzen unterschiedliche Skalen, Antwortoptionen und -formulierungen. Ein Vergleich setzt daher ein gewisses Maß an Interpretation voraus, so wurden bspw. bei Umfragen mit Likert-Skalen zustimmenden Antworten aufsummiert.

Trotz dieser methodischen Unterschiede zeigen die ausgewerteten Umfragen eine hohe Übereinstimmung in den identifizierten Problemfeldern. Daraus ergibt sich ein in Summe einheitliches Bild der Wahrnehmung Digitaler Zwillinge, welches auch mit qualitativen Umfragen und Expertenbefragungen im Einklang steht. So lassen sich drei zentrale Schlüssel-Herausforderungen bei der Einführung Digitaler Zwillinge identifizieren, welche umfragenübergreifend von den Teilnehmern als sehr relevant angegeben werden. Die Konsistenz der Ergebnisse über verschiedene Branchen, Unternehmensgrößen und Rollenprofile hinweg deutet darauf hin, dass es sich nicht um isolierte Einzelfallprobleme, sondern um strukturelle Herausforderungen handelt. Im Folgenden sind die Kernerkenntnisse hinsichtlich der Herausforderungen und Hürden zusammengefasst.

3.1 Technische Herausforderungen: Datenerfassung und -integration

Ein Digitaler Zwilling ist auf Echtzeit-Betriebsdaten des Physischen Zwillinges angewiesen, um dessen Verhalten abbilden zu können. Entscheidend ist dabei nicht allein die Verfügbarkeit von Daten, sondern deren Eignung für das jeweilige Anwendungsszenario. Dabei stellt aus technischer Sicht insbesondere die Erfassung der Betriebsdaten und deren Integration in ein komplexes Geflecht aus Datenströmen potentielle Anwender vor Hürden. Fehlende oder falsch eingesetzte Sensorik ist einer der Hauptgründe dafür, dass Daten unvollständig, fehlerhaft, widersprüchlich und insgesamt nicht vertrauenswürdig sind. Unzureichende oder verrauschte Daten erschweren dabei eine anschließende belastbare Nutzung der damit gespeisten Simulations- und Berechnungsmodelle. Eine

hervorzuhebende Rolle spielt auch die Geschwindigkeit, mit der die Sensorik schnelle Vorgänge im Physischen Zwilling erfassen kann, aber auch die Echtzeitfähigkeit, mit der die Daten übermittelt und synchronisiert werden können. Dabei können abhängig von der Messgeschwindigkeit schnell sehr große Datenmengen aus verschiedenen Datenquellen anfallen. Ohne eine vorgelagerte Strukturierung und Systemabgrenzung steigt dabei die Komplexität der Datenverarbeitung erheblich. Fehlende Standardisierung und semantische Inkonsistenzen erschweren eine nahtlose Zusammenarbeit verschiedener Systeme, auch Interoperabilität genannt. Gründe hierfür sind nicht zuletzt historisch gewachsene und heterogene IT Infrastrukturen innerhalb der Unternehmen. Durch fehlende (durchgängige) Schnittstellen führt dies schnell zu Datensilos [6,8,17–24].

Technische Herausforderungen: Datenqualität und -integration

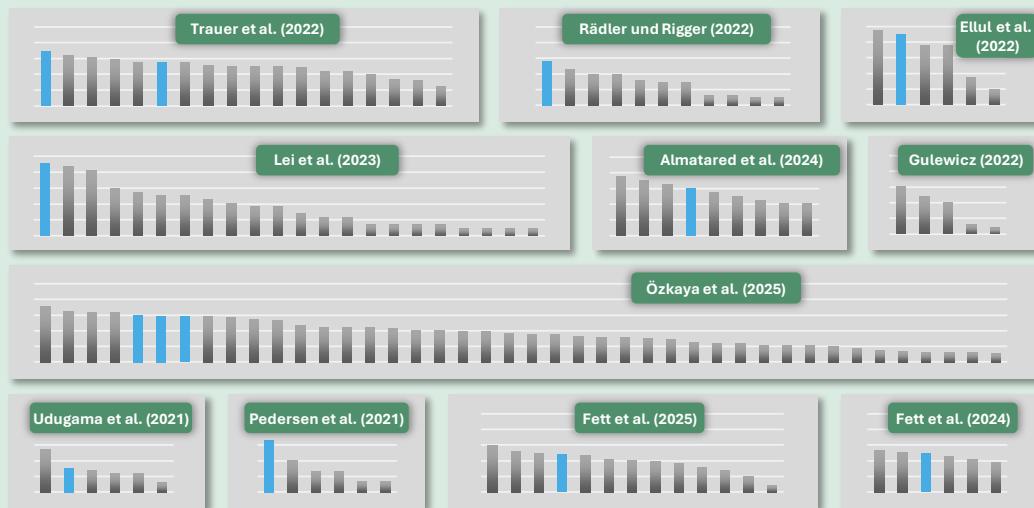


Abbildung 3 - Qualitative Gegenüberstellung der Herausforderungen Digitaler Zwillinge verschiedener Umfragen, technische Herausforderungen blau hervorgehoben, in Anlehnung an [1,6–8,17–25]

3.2 Wirtschaftliche Herausforderungen: Hohe Kosten, geringer (wahrgenommener) Mehrwert

Die Entwicklung Digitaler Zwillinge ist ein aufwändiges Unterfangen, wobei ein hoher Bedarf an gleichermaßen personellen, finanziellen sowie zeitlichen Ressourcen zu decken ist. Dies geht mit erheblichen initialen Investitionskosten einher, die Unternehmen vor eine substantielle Hürde stellen können. Ein erheblicher Teil dieser Kosten entsteht bereits, bevor ein produktiver Einsatz des Digitalen Zwillinges erreicht wird. Nicht nur sind Entwicklungs-, Schulungs- und Personalkosten zu tragen, sondern auch Investitionen für Sensorik und IT Infrastrukturen notwendig. Darüber hinaus fallen laufende Kosten an, etwa zur Daten- und Modellpflege des Digitalen Zwilling, sowie zur Wartung von Sensorik und IT Komponenten. Den Kosten steht ein meist

nicht eindeutig wahrnehmbarer Mehrwert gegenüber. Kosten und Nutzen Digitaler Zwillinge sind zeitlich und organisatorisch häufig entkoppelt, während die Kosten sofort anfallen, entsteht der wirtschaftliche Nutzen Digitaler Zwillinge eher langfristig und indirekt, etwa durch bessere Entscheidungsgrundlagen oder die Reduktion von Ausfällen. Der Mehrwert ist damit nur schwer unmittelbar quantifizierbar, weshalb Verantwortliche Probleme damit haben, das Kosten/Nutzen-Verhältnis abzuschätzen. Insbesondere bei komplexen technischen Systemen lassen sich Nutzenpotenziale vorab nur eingeschränkt prognostizieren. Dies führt dazu, dass Investitionsentscheidungen häufig vertagt oder auf kleine Pilotprojekte begrenzt werden [6,8,17,18,20–25].

Wirtschaftliche Herausforderungen: Hohe Kosten, wenig (wahrgenommener) Nutzen

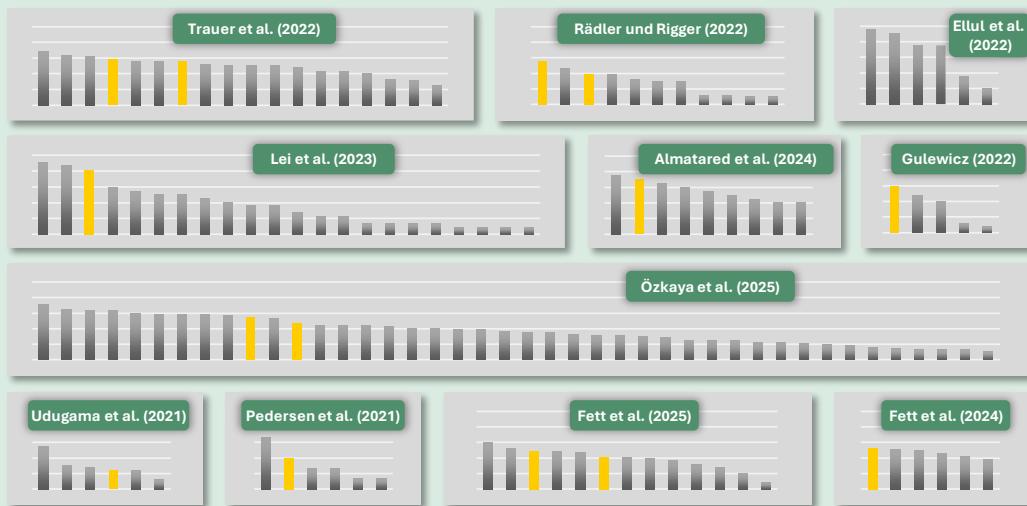


Abbildung 4 - Qualitative Gegenüberstellung der Herausforderungen Digitaler Zwillinge verschiedener Umfragen, wirtschaftliche Herausforderungen gelb hervorgehoben, in Anlehnung an [1,6–8,17–25]

3.3 Organisatorische Herausforderungen: Fehlendes Know-How und Erfahrung

Die Entwicklung Digitaler Zwillinge setzt ein hohes Maß an spezifischer Expertise und Know-How voraus. Alle Umfragen kommen einheitlich zu der Erkenntnis, dass eben diese notwendige Expertise und Know-How eine der größten Schlüssel-Herausforderungen Digitaler Zwillinge darstellt. Die aktuell bestehende Qualifikation in den Unternehmen wird in Summe als unzureichend eingeschätzt. Diese Herausforderung wird durch hohen Schulungsaufwand der eigenen Mitarbeiter, sowie mangelnde Verfügbarkeit qualifizierter Fachkräfte und Spezialisten weiter erschwert. Auch sind Digitale Zwillinge häufig keinen klaren organisatorischen Verantwortungsbereichen zugeordnet und die Rolle von bspw. der Entwicklungsabteilung, IT, Instandhaltung

und Management ist meist ungeklärt. Dies geht Hand in Hand mit der Bereitschaft, aber auch Reife des Unternehmens, Digitale Zwillinge bei sich einzuführen. Fehlendes Know-How kann Ursache für unpräzise Erwartungshaltungen sein und zu Skepsis und mangelndem Vertrauen gegenüber Digitalen Zwillingen führen. Diese organisatorischen Aspekte stellen für sich bereits Schlüssel-Herausforderungen dar, darüber hinaus verstärken sie auch technische und wirtschaftliche Probleme. Fehlendes Know-How erschwert die technische Implementierung Digitaler Zwillinge und führt zu hohen Integrationskosten. Auch der erreichbare Mehrwert sowie geeignete Geschäftsmodelle Digitaler Zwillinge ist ohne entsprechende Expertise nur schwer abzuschätzen [6,17–23,25].

Organisatorische Herausforderungen: Fehlendes Know-How und Erfahrung

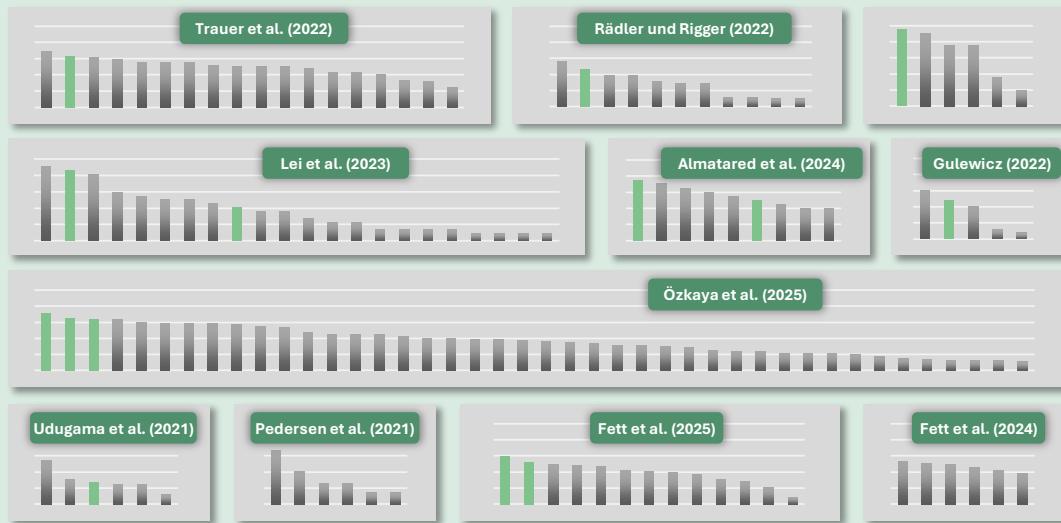


Abbildung 5 - Qualitative Gegenüberstellung der Herausforderungen Digitaler Zwillinge verschiedener Umfragen, organisatorische Herausforderungen grün hervorgehoben, in Anlehnung an [1,6–8,17–25]

3.4 Unterschiede in der Wahrnehmung der Herausforderungen

Einige der Studien haben auch untersucht, inwiefern die Wahrnehmung Digitaler Zwillinge von der Unternehmensgröße der Befragten abhängt. Die Herausforderungen Digitaler Zwillinge werden von KMU-Vertretern im Schnitt höher gewichtet als von Vertretern von Großunternehmen. KMU sind stärker von fehlendem Know-How und Fachpersonal betroffen und sind eher dazu gewillt, externe Dienstleister einzubeziehen. Ressourcenbedingt legen sie größeren Wert darauf, die Kosten so gering wie möglich zu halten. Dazu streben sie möglichst standardisierte Lösungen an und nehmen auch einen reduzierten Funktionsumfang in Kauf. Im Kontrast dazu messen Großunternehmen den Herausforderungen Digitaler Zwillinge im Schnitt weniger Bedeutung bei, als KMU dies tun. Gleichzeitig gewichten sie die Potentiale höher. Größere Budgets geben Großunternehmen den Handlungsspielraum, den Fokus auf langfristigen Nutzen, anstatt auf kurzfristige Kosten zu legen. Sie tendieren dazu, eigene Fachkräfte auszubilden und einzustellen, welche maßgeschneiderte Lösungen mit großem Funktionsumfang entwickeln können [6,7,26].

4 Zusammenfassende Implikationen und Handlungsbedarf

Digitale Zwillinge befinden sich an einem kritischen Übergangspunkt von einem überwiegend akademischen Forschungsthema hin zu einem praxisrelevanten Instrument industrieller Digitalisierung. Gleichzeitig wird jedoch klar, dass ihr breiter Einsatz weniger an fehlenden

technologischen Konzepten scheitert, sondern vielmehr an der erfolgreichen Bewältigung technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Herausforderungen. Diese Herausforderungen sind eng miteinander verknüpft und verstärken sich gegenseitig, wenn sie nicht ganzheitlich adressiert werden. Diese Studienergebnisse decken sich auch mit Beobachtungen aus der Praxis. Die Entwicklung Digitaler Zwillinge stellt vor allem für Vertreter des Mittelstandes eine kaum zu bewältigende Herausforderung dar. Vor dem Hintergrund eines ohnehin schon fordernden Tagesgeschäftes und fehlenden Fachpersonals, fehlen meist Kapazitäten zur Einführung dieser neuen Technologie. Weiter stellt der digitale Aspekt Digitaler Zwillinge nicht nur Produktentwickler vor Hürden, sondern fällt meist auch nicht in den unmittelbaren Kompetenzbereich der unternehmensinternen IT-Abteilung.

Für Unternehmen, insbesondere im Mittelstand, ergibt sich daraus ein klarer Handlungsbedarf. Konkret bedeutet dies, dass erfolgreiche Entwicklungsprojekte für Digitale Zwillinge nicht als einmalige Technologieinvestitionen verstanden werden sollten. Zur Überwindung technologischer und wirtschaftlicher Herausforderungen ist zunächst ein Aufbau von unternehmensinternem Know-How und Expertise zu empfehlen. Ausgehend von dieser Basis können geeignete Geschäftsmodelle für und mit Digitalen Zwillingen erarbeitet werden und technische Hürden, wie etwa hinsichtlich der Datenerfassung und -Integration, überwunden werden. Der Aufbau ebendieser Know-Hows und Expertise im Bereich Digitaler Zwillinge kann über Schulungs- und Weiterbildungsangebote adressiert werden. Größeren Praxisbezug bietet ein alternativer Ansatz, bei dem in Gemeinschaftsprojekten mit spezialisierten Unternehmen ein projektbegleitender Wissenstransfer stattfindet.

5 Referenzen

1. Fett, M. Ein Vorgehensmodell zur methodischen Entwicklung Digitaler Zwillinge; Technische Universität Darmstadt, [eingereichte Dissertation].
2. International Organization for Standardization. ISO/IEC 30173, *Digital Twin - Concepts and terminology: Part 1: Overview and general principles*, 2023.
3. International Organization for Standardization. ISO/IEC 20924:2024 *Internet of Things (IoT) and digital twin — Vocabulary*, 2024 (20924).
4. IDTA. IDTA Glossar: Digitaler Zwilling. Online verfügbar:
<https://industrialdigitaltwin.org/glossar/digitaler-zwilling> (zuletzt geprüft am 31.07.2025).
5. Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.-D.; Wartzack, S. WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **2020**, 115, 47–50, doi:10.3139/104.112311.
6. Fett, M.; Breimann, R.; Mustafa, A.; Hirsch, A.; Cai, C.; Striebel, M.; Dagnew, J.; Kirchner, E. Barriers and drivers of digitalization of technical products: a survey in industry. *Forsch Ingenieurwes* **2025**, 89, doi:10.1007/s10010-025-00856-5.
7. Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S.; Wartzack, S.; Kirchner, E. Practical insights into the perception of digital twins: An analysis of surveys. *Forsch Ingenieurwes* **2025**, 89, doi:10.1007/s10010-025-00879-y.
8. Fett, M.; Zwickler, J.; Wilking, F.; Goetz, S.; Schweigert-Recksiek, S.; Hicks, B.; Nespoli, O.; Wärmefjord, K.; Wartzack, S.; Kirchner, E. A survey on the industry's perception of digital twins – a follow-up to the digital twin workshop at the DESIGN Conference 2022. *Proc. Des. Soc.* **2024**, 4, 2039–2048, doi:10.1017/pds.2024.206.
9. Gartner Inc. *Gartner Identifies Five Emerging Technology Trends That Will Blur the Lines Between Human and Machine*, 2018. Online verfügbar:
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine> (zuletzt geprüft am 29.12.2025).
10. FVA e.V. *FVA-Technologietrend-Radar 2025+*, 2024. Online verfügbar: https://www.themis-wissen.de/stream/document/270888/file/inline/**/IM_841_III_AB_Trendradar_Klickdoku_2025+.pdf (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
11. Gartner Inc. *Emerging Tech Impact Radar: 2024*, 2024. Online verfügbar:
<https://www.gartner.com/en/documents/5097331> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
12. Google Trends. Digitaler Zwilling: Interesse im zeitlichen Verlauf. Online verfügbar:
<https://trends.google.de/trends/explore?date=all&geo=DE&q=%2Fg%2F11b90fjhmq&hl=de> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
13. toobler.com. *The Emerging Digital Twin Market In 2025*, 2025. Online verfügbar:
<https://www.toobler.com/blog/digital-twin-market> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
14. precedenceresearch.com. What is the Digital Twin MarketSize? Online verfügbar:
<https://www.precedenceresearch.com/digital-twin-market> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
15. market.us. *Global Digital Twin Market*, 2024. Online verfügbar:
<https://market.us/report/digital-twin-market/> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).
16. grandviewresearch.com. *Global Digital Twin Market Size & Outlook, 2026-2033*, 2025. Online verfügbar: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/digital-twin-market-size/global> (zuletzt geprüft am 28.12.2025).

17. Rädler, S.; Rigger, E. A Survey on the Challenges Hindering the Application of Data Science, Digital Twins and Design Automation in Engineering Practice. *Proc. Des. Soc.* **2022**, *2*, 1699–1708, doi:10.1017/pds.2022.172.
18. Trauer, J.; Mutschler, M.; Mörtl, M.; Zimmermann, M. Challenges in Implementing Digital Twins – a Survey. In *Volume 2: 42nd Computers and Information in Engineering Conference (CIE)*. ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, St. Louis, Missouri, USA, 14–17 Aug. 2022; American Society of Mechanical Engineers, 2022, ISBN 978-0-7918-8621-2.
19. Ellul, C.; Stoter, J.; Bucher, B. LOCATION-ENABLED DIGITAL TWINS – UNDERSTANDING THE ROLE OF NMCAS IN A EUROPEAN CONTEXT. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **2022**, *X-4/W2-2022*, 53–60, doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-53-2022.
20. Lei, B.; Janssen, P.; Stoter, J.; Biljecki, F. Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction* **2023**, *147*, 104716, doi:10.1016/j.autcon.2022.104716.
21. Almatared, M.; Liu, H.; Abudayyeh, O.; Hakim, O.; Sulaiman, M. Digital-Twin-Based Fire Safety Management Framework for Smart Buildings. *Buildings* **2024**, *14*, *4*, doi:10.3390/buildings14010004.
22. Özkaya, M.; Akdur, D.; Turunc, A. *Understanding Practitioners’ Perspectives on Digital Twin: A Survey*, 2025.
23. Udagama, I.; Öner, M.; Lopez, P.C.; Beenfeldt, C.; Bayer, C.; Huusom, J.K.; Gernaey, K.V.; Sin, G. Towards Digitalization in Bio-Manufacturing Operations: A Survey on Application of Big Data and Digital Twin Concepts in Denmark. *Front. Chem. Eng.* **2021**, *3*, doi:10.3389/fceng.2021.727152.
24. Pedersen, T.I.; Størdal, H.G.; Bjørnebekk, H.H.; Vatn, J. A Survey on the Use of Digital Twins for Maintenance and Safety in the Offshore Oil and Gas Industry. In *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)*. Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference, 19–23 Sep. 2021; Castanier, B., Cepin, M., Bigaud, D., Berenguer, C., Eds.; Research Publishing Services: Singapore, 2021; pp 1704–1711, ISBN 978-981-18-2016-8.
25. Gulewicz, M. Digital twin technology — awareness, implementation problems and benefits. *Engineering Management in Production and Services* **2022**, *14*, 63–77, doi:10.2478/emj-2022-0006.
26. Liu, Z.; Hansen, D.W.; Chen, Z. Leveraging Digital Twins to Support Industrial Symbiosis Networks: A Case Study in the Norwegian Wood Supply Chain Collaboration. *Sustainability* **2023**, *15*, 2647, doi:10.3390/su15032647.