

Digitale Zwillinge in der naturwissenschaftlichen Bildung

Konstruktivistische Perspektive

Lena Geuer¹  und Roland Ulber¹ 

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Zusammenfassung

Digitale Medien sind elementarer Bestandteil in Lehr-Lern-Prozessen. Durch Verknüpfung mit den physischen, medialen und virtuellen Lebensräumen der Schüler:innen verfügen digitale Medien über Gegenwarts- und insbesondere auch über Zukunftsbedeutung für die Heranwachsenden. Die didaktisch-methodische Reflexion und Bewertung von technologischen Innovationen aus dem Internet of Things (IoT) oder der Industrie 4.0 ermöglichen, grundlegende Aussagen zu fächerspezifischen sowie fächerübergreifenden Potenzialen eines Einsatzes im schulischen Kontext zu formulieren. In diesem Beitrag werden die Potenziale für ein gelingendes Lehren und Lernen in der naturwissenschaftlichen Bildung von digitalen Zwillingen zusammenfassend betrachtet. Digitale Zwillinge sind bereits in der industriellen Prozessentwicklung und -optimierung implementiert. Hierbei zeigen die in digitalen Zwillingen repräsentierten Vernetzungsstrukturen zwischen digitaler und realer Welt besonders deren Potenzial in den Bereichen künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen und Data-Mining-Prozessen. Um Bildungsperspektiven für den naturwissenschaftlichen Unterricht abzuleiten, werden die eingehenden und ausgehenden Datenstrukturen und deren technologische Funktionsweisen in digitalen Zwillingen näher betrachtet. Der Beitrag thematisiert den Blick auf digitale Zwillinge als intelligente neue Bildungstechnologie in Lehr-Lern-Prozessen, welche auch im industriellen Sektor noch nicht an ihrem Entwicklungsendpunkt steht und vielfältige Anwendungspotenziale im Schulkontext, viele offene Forschungsfragen und Entwicklungspotenziale im Rahmen der Bildungsforschung bereithalten.

Digital Twins in Science Education

Abstract

Digital media are an elementary component of teaching-learning processes. By linking them to the physical, medial, and virtual living spaces of the students, digital media have present and future importance for the adolescents. The didactic-methodical reflection

and evaluation of technological innovations from the Internet of Things (IoT) or Industry 4.0 make it possible to formulate fundamental statements about subject-specific as well as cross-curricular potentials for use in the educational context. In this article, the potentials for successful teaching and learning in science education of digital twins are summarized. Digital twins are already implemented in industrial process development and optimization. Basically, the networking structures between digital and real world represented in digital twins and their potential in the fields of artificial intelligence, machine learning and data mining processes take a significant focus. To derive educational perspectives for science education, the incoming and outgoing data structures, and their modes of operation in digital twins are examined in more detail. The article addresses the view of digital twins as an intelligent new educational technology in teaching-learning processes, which is not yet at its developmental endpoint even in the industrial sector and holds diverse application potentials in the school context, many open research questions, and development potentials in the context of educational research.

1. Einleitung

Bildung hat den konkreten Auftrag, in einer vielfältig geprägten Medienwelt die Entwicklung von Wissen, Fertigkeiten und Fähigkeiten hin zu einem mündigen, kreativen, selbstorganisiert und zielorientiert handelnden Menschen zu begleiten und zu unterstützen (Alexander, Wedding, und Schützenmeister 2022). Bereits Nelson Mandela erkannte in diesem Kontext den besonderen Stellenwert der Bildung und bezeichnet diese als «die mächtigste Waffe, die du verwenden kannst, um die Welt zu verändern». Die Gestaltung von Bildung sollte so im Einklang mit den physischen, medialen und virtuellen Lebensräumen stehen und nicht nur eine Gegenwarts- sondern insbesondere auch eine Zukunftsbedeutung für die Heranwachsenden haben (Hellriegel und Čubela 2018; El-Mafaalani 2020; Lesch und Forstner 2020). Hierbei besteht die Herausforderung, eine didaktisch sinnvolle Medienvielfalt, Perspektiven der Medienkompetenz und technische Funktionalitäten der verfügbaren Medien in Lehr-Lern-Prozessen untereinander auszubalancieren. Mit dem *DigitalPakt Schule* von Bund und Ländern sollen hierzu die infrastrukturellen Grundlagen für digitale Bildung in deutschen Schulen und Professionalisierungsangebote in der Lehrkräftebildung geschaffen werden (BMBF 2018). Im Kontext des allgemeinen Bildungsauftrags der Schulen ist es demnach notwendig, Bildungsangebote zu ermöglichen, die durch geeignetem Einsatz von Medien deren Perspektive und Zukunftsbedeutung in der Lebens- und Arbeitswelt der Lernenden zeigen. Die schnelllebige Entwicklungsgeschichte des Internet of Things (IoT) und der Industrie 4.0 hat zur Folge, dass die Medien, die im schulischen Unterricht zum Einsatz kommen, zum Zeitpunkt des beruflichen Einstiegs der Schüler:innen zumeist veraltet sind. Hier setzen die Ziele der Bildungsforschung im Kontext Digitalisierung und Weiterentwicklung des

Unterrichts an, um *erstens* die Brücke zwischen Bildungsangeboten und zukünftigen Arbeits- und Berufsanforderungen zu bauen und *zweitens* technologische Innovationen auf einen didaktisch-methodischen Mehrwert und den Beitrag zu dem Lernerfolg der Schüler:innen zu untersuchen (KMK 2016). Beispielsweise erarbeiten und betonen Hellriegel und Čubela (2018) aus konstruktivistischer Sicht Einsatz und Wirkung auf den Lernerfolg von Virtual Reality im schulischen Unterricht und stellen diesem den Bedarf an notwendiger technischer Infrastruktur, medienpädagogischer Kompetenz der Lehrkräfte und Ausrichtung am schulischen Lehr-Lerngeschehen gegenüber.

Der vorliegende Beitrag setzt Impulse hin zum Einsatz technologischer Innovationen der Industrie 4.0 im schulischen Kontext und zeigt eine Übersicht didaktisch-methodischer Potenziale von digitalen Zwillingen im berufsorientierten naturwissenschaftlichen Unterricht. Die Facetten der Begriffsdefinition eröffnen den Blick auf digitale Zwillinge als «Gamechanger», wodurch die Vielzahl von Anwendungen neben der Industrie 4.0 im engen Zusammenhang zu den Schlagwörtern und Technologien stehen – wie IoT, künstliche Intelligenz (KI), maschinelles Lernen und Datenanalyse. Mit der zunehmenden Integration digitaler Zwillinge in den industriellen Sektor und die Alltagswelt, z. B. in Smart-Home oder Connected Car-Apps, ist die Formulierung entsprechender Bildungsziele und -perspektiven bedeutend, um entsprechend einer qualitativ hochwertigen und zukunftsweisenden Bildung (SDG 4, United Nations 2020) gerecht zu werden.

Basierend auf einer bereichsübergreifenden systematischen Mapping-Studie zur Softwareentwicklung für digitale Zwillinge von Dalibor et al. (2022) werden im Beitrag die Anwendungsfacetten im Bereich «Education» vertiefend betrachtet, aktuelle Entwicklungen herausgestellt und Ideen zur Umsetzung zu methodisch-didaktischen Konzepten ergänzt.

Der vorliegende Übersichtsartikel zeigt und beleuchtet folgende vorab zusammengefasste Aussagen zu digitalen Zwillingen im naturwissenschaftlichen Unterricht und untermauert diese mit Beispielen:

- Digitale Zwillinge zeigen das Profil einer Displaytechnologie als multiple externe Repräsentation im Kontext des MINT-Unterrichts und als effektives Lehr-Lern-Element im Remote-Learning, beispielsweise in online Lernplattformen.
- Digitale Zwillinge sind zukünftige KI-basierte (Learning-Analytics-)Tools im Spannungsfeld von Lerngegenstand, Lehrenden und Lernenden mit digitaler Echtzeitrepräsentation individueller Lernanlässe (durch z. B. Cyber-Physical Interaktionen).
- Digitale Zwillinge sind intelligente Repräsentationen von gruppenspezifischen (z. B. Classroom Digital Twins, Digital Twin Campus-Systeme) oder personenbezogenen individualisierten KI-gestützten Modellen zu Lehr-Lern-Prozessen (z. B. Cyber-Physical Human Systeme).

Nach einer Einführung in die facettenreiche Definition von digitalen Zwillingen (2) werden die oben genannten Aussagen in Abhängigkeit der Funktionsweisen von digitalen Zwillingen und den eingehenden und ausgehenden Datenstrukturen erläutert und anhand von Beispielen gezeigt (3). Hierzu werden die Potenziale von digitalen Zwillingen für ein gelingendes, innovatives Lehren und Lernen in der naturwissenschaftlichen Ausbildung ergänzt (4). Zusammenfassend stellt der Beitrag nach aktuellem Stand verschiedene Anwendungsfälle für digitale Zwillinge in der MINT-Bildung heraus und beleuchtet die Chancen und Herausforderungen, die sich aus einer Vielzahl von Anforderungen an digitale Zwillinge im Bildungskontext ergeben.

2. Digitaler Zwilling – Facetten der Begriffsdefinitionen

Der Begriff «digitaler Zwilling» umfasst ein Konzept, unter dem die *Reproduktion eines physischen Systems in der digitalen Welt* verstanden wird (Twinning) (Tao et al. 2019b; Holler, Uebernickel, und Brenner 2016; Cortés et al. 2020; Baumgartner et al. 2022; Kritzigner et al. 2018; Tao et al. 2018). Die zentralen Aspekte von digitalen Zwillingen sind, manuelle, automatisierte oder in Echtzeit erfasste Daten des physischen Objekts in einem einheitlichen Format bereitzustellen, diese Datenstrukturen zu verarbeiten und unterschiedlich darzustellen. Auf der Basis von mathematischen Modellen und Algorithmen im digitalen Zwilling können so mit den vorhandenen (Echtzeit-)Daten Simulationen, Vorhersagen, Optimierungen oder Kontrollen an virtuellen Modellen der physischen Objekte visualisiert und entsprechende Handlungsschritte effizient entschieden bzw. reflektiert werden. Aufgrund des Wachstums des IoTs und der Integration von Cyber-Physical-Interaktionen ermöglichen integrierte Sensorsysteme eine zunehmende Intelligenz des digitalen Zwillings. Diese werden zur Erzeugung von Echtzeitdaten genutzt, um die bidirektionale Interaktion zwischen dem physischen Modell und dem entsprechenden virtuellen Modell datenbasierten zu erweitern (Kritzinger et al. 2018; Grieves 2014; Negri, Fumagalli, und Macchi 2017; Geretti, Rosa, und Terzi 2012). Das Konzept «digitaler Zwilling» kann daher durch die von Glaessgen und Stargel (2012) stammende und von Tao et al. (2018, 3566) formulierte Definition

«als integrierte multiphysikalische, multiskalierbare, probabilistische Simulation eines komplexen Produkts, das die besten verfügbaren physikalischen Modelle, Sensor-Updates usw. nutzt, um das Leben des entsprechenden Zwillings widerzuspiegeln»,

erweitert werden. Daraus ergibt sich, dass digitale Zwillinge mit der Kombination mehrerer Simulationen komplexe Wechselwirkungen innerhalb eines Systems, aber auch zwischen Systemen abbilden können.

Die vielfältige und branchendifferenzierte Anwendung von digitalen Zwillingen mit einem sehr offenen und sich immer weiter entwickelten Konzeptverständnis erfordert konkrete konzeptionelle Kernpunkte, die sich im Grad der Datenintegration zwischen dem physischen System und dem digitalen Zwilling unterscheiden (Kritzinger et al. 2018; Holler, Uebernickel, und Brenner 2016; Fuller et al. 2020). Fuller et al. (2020) wie auch Kritzinger et al. (2018) messen den Grad der Datenintegration von der manuellen Modellierung bis hin zur vollständigen Integration durch einen sensorbasierten Echtzeitdatenaustausch und gliedern das Konzept ‚digitaler Zwilling‘ in drei Ebenen (Kritzinger et al. 2018; Fuller et al. 2020). In Abbildung 1 sind die drei Konzeptebenen ‚Digitales Modell‘, ‚Digitaler Schatten‘ und ‚Digitaler Zwilling‘ mit den entsprechenden manuellen oder automatisierten Datenflüssen zwischen physischem Objekt und einem digitalen Objekt dargestellt (ebd.).

Darstellung Richtungen Datenfluss Reales Objekt

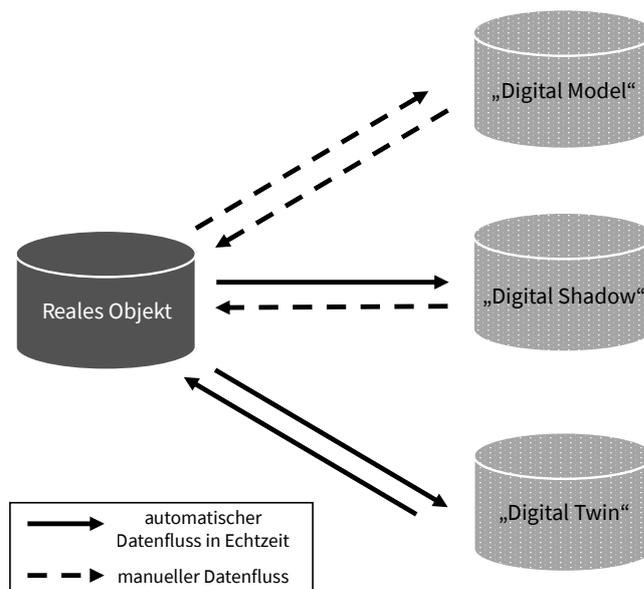


Abb. 1: Die drei Konzeptebenen ‚Digitales Modell‘, ‚Digitaler Schatten‘ und ‚Digitaler Zwilling‘ mit den entsprechenden modelltypischen Datenflüssen zwischen physischem und digitalen Objekt nach Kitzinger et.al. (2018) und Fuller et. al (2020).

1. *Digitales Modell*: Digitale Repräsentationen im digitalen Modell werden mathematisch modelliert und können digitale Darstellungen eines bestehenden oder geplanten physischen Objekts sein, ohne dass ein automatischer Datenaustausch zwischen den physischen und digitalen Objekten stattfindet. Eine Änderung des Zustands des physischen Objekts hat so keine direkten Auswirkungen auf das digitale Objekt und umgekehrt. In einem digitalen Modell einer industriellen

Produktionsanlage können beispielsweise Planungs-, Konstruktions- und Optimierungsaspekte betrachtet werden. Interaktionen sowie Simulationen sind im digitalen Modell möglich, jedoch basiert es auf mathematischen Modellierungen und stellt eine Repräsentation des realen oder geplanten Objekts ohne sensorbasierten Echtzeitdatenaustausch da.

2. *«Digitaler Schatten»*: Digitale Repräsentationen werden durch einen einseitigen automatisierten Echtzeitdatenaustausch zwischen dem Zustand eines bestehenden physischen Objekts und einem digitalen Objekt visualisiert. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts führt zu einer Zustandsänderung im digitalen Objekt, aber nicht umgekehrt. In Abgrenzung zu einem digitalen Modell basiert der digitale Schatten auf einer Datenerfassung des Echtzeitdatentransfers ausgehend von dem realen Objekt. Im Beispiel einer industriellen Produktionsanlage ist die Voraussetzung, dass in der Anlage entsprechende Sensoren (z. B. für Temperatur) verbaut sind, die Echtzeitdaten an den digitalen Schatten weitergeben. Im digitalen Schatten ergänzt diese Datenbasis das digitale Modell der Produktionsanlage. Auf dieser realen Datengrundlage lassen sich Simulationen mit dem digitalen Schatten der Anlage durchführen, die sich wiederum auf die Optimierung und Prozessanalyse beziehen. Der Datenaustausch führt jedoch nicht vom digitalen Schatten zurück zum realen Objekt, sodass die Interaktionen am digitalen Schatten sich nicht auf den Realzustand der Produktionsanlage auswirken.
3. *«Digitaler Zwilling»*: Vollständig integrierter Echtzeitdatenaustausch mit automatisierten Datenflüssen zwischen einem bestehenden physischen System und einem digitalen Objekt in beide Richtungen. Eine Zustandsänderung des physischen Objekts führt im Rahmen der erlaubten Zustandsgrößen zu einer Zustandsänderung des digitalen Objekts und umgekehrt. Daher ist anzunehmen, dass in einem digitalen Zwilling einer industriellen Produktionsanlage auf Basis der Echtzeitdaten Optimierungsschritte analysiert und direkt an die reale Anlage vermittelt, getestet und wiederum in einer folgenden Feedbackschleife im digitalen Zwilling reflektiert werden. Beispielsweise können von einem Sensor die Echtzeitdaten zur Temperatur im Produktionsprozess an den digitalen Zwilling übertragen werden. Daraufhin können mithilfe einer datenbasierten Simulation der Temperaturregelung im digitalen Zwilling neue Produktionsdaten ermittelt werden, z. B. geringere Temperatur (neue Zustandsgröße). Im Falle eines digitalen Zwillings werden die neuen Daten zur Zustandsgröße Temperatur direkt an das reale Objekt vermittelt und mit der Zustandsänderung können wiederum neue Echtzeitdaten an den digitalen Zwilling zurückgemeldet werden, um diese wiederum bzw. deren Effekte auf andere Zustandsgrößen zu analysieren.

Neben der Definition der Konzeptebene bestimmen so die aus- und eingehenden Datenstrukturen auch die Funktionsweise eines digitalen Zwillings, um wiederum einen bestimmten Zweck bezüglich seines physischen Gegenstücks zu erfüllen.

3. Funktionsweisen digitaler Zwillinge

Aus dem bereits grossen Spektrum der Anwendungsfelder von digitalen Zwillingen in der Industrie 4.0 werden in diesem Kapitel die Funktionsweisen von digitalen Zwillingen aus technischer Perspektive beleuchtet. Um die Potenziale digitaler Zwillinge in der naturwissenschaftlichen Bildung abzuleiten, ist es notwendig, deren Funktionsweisen und hierbei die eingehenden und ausgehenden Datenstrukturen parallel dazu zu betrachten.

In der Mapping-Studie von Dalibor et al. (2022) werden mögliche eingehende (Input) und ausgehende (Output) Datenstrukturen, Aspekte bezüglich der Realisierung von künstlichen Entscheidungsprozessen, Identifikation von Reaktionen auf ein- und ausgehende datenorientierte Interaktion bzw. Kommunikation mit der Umgebung und deren Einflüsse betrachtet. Daran angelehnt können entsprechende Potenziale für den Bildungsprozess im folgenden Kapitel abgeleitet werden.

Zu den Inputs bezüglich der Funktionsweise digitaler Zwillinge zählen alle Maschinendaten, die von Sensoren oder von den Maschinen selbst ausgegeben werden (Padovano et al. 2018; Ellgass et al. 2018), die neben den vorab bereitgestellten spezifizierten mathematischen Modellen und Algorithmen die Datengrundlage für die Modelle und Simulationen im digitalen Zwilling liefern (Ciavotta et al. 2017; Zhang et al. 2017). Die Konfiguration eines digitalen Zwillings kann ausserdem auf Daten aus direkten Interaktionen bzw. Benutzereingaben, z. B. mit einer Benutzeroberfläche oder Sensorik zur Bewegungserfassung, beruhen (Zhang et al. 2017; Bekker 2018). Hinsichtlich der Implementierung digitaler Zwillinge in Bildungsprozessen ist es interessant, dass in Inputdaten neben den eher beschreibenden Datenmengen des physischen Gegenstücks auch Daten zu den individuellen Interaktionen zwischen physischem Gegenstück und dem Nutzer eingepflegt und bereitgestellt werden können.

Hierbei sind die vielfältigen Output-Möglichkeiten (Dalibor et al. 2022) als eine Art von Analyseergebnis der Inputdaten oder eines erweiterten intuitiven Output-Typs der Daten zu betrachten, um die Umgebung bzw. das physische System auf unterschiedliche Weise zu beeinflussen. Das Konzept des digitalen Zwillings ist daher um Monitoring-Ansätze zu ergänzen, um Analysen von Vorhersagen und Schätzungen über das Systemverhalten, mögliche Systemausfälle und die Lebenserwartung zu treffen. Diese erlauben es, digitale Zwillinge auch zur Überwachung sicherheitskritischer Systeme einzusetzen. Zu den Outputs zählen demnach Vorschriften, detaillierte Steuerbefehle und Planungsdaten für Anweisungen über Änderungen, die

z. B. an der Parameterkonfiguration des physischen Objekts ausgeführt werden sollen. Hierbei übernimmt der digitale Zwilling in der starken Interaktion zwischen mit seinem physischen Gegenstück die Funktion eines Controllers. Als weitere Ausgabe von Datenstrukturen eines digitalen Zwillings wird in vielen Anwendungsfällen die Visualisierung in einem User-Interface oder als 3D-Modell genannt (Bai, Wang, und Wang 2021; Schleich, Roth, und Schaechtel 2022).

Zur Realisierung von künstlichen Entscheidungsprozessen, Interaktionen bzw. Kommunikation mit der Umgebung und dem physischen Objekt können verschiedene Entscheidungsfunktionalitäten in einem digitalen Zwilling vorliegen, die dessen Entscheidungsfindungsfacette beschreiben (Dalibor et al. 2022). Die Entscheidungen basieren auf der Identifikation von Reaktionen auf Inputs zum aktuellen Zustand sowie den Bedingungen des physischen Objekts und seiner Umgebung. Hierzu zählen Methoden und Techniken aus den Bereichen Data Mining wie z. B. Big-Data-Methoden (Tao et al. 2018) oder Datenbereinigungstechniken (Yusupbekov et al. 2018), maschinelles Lernen, wie z. B. künstliche neuronale Netze (Dong et al. 2019) oder Deep Learning (Uzun et al. 2019) und unterschiedliche Reasoning-Techniken (Kaivooja et al. 2019; Wantia und Rossmann 2017), die auch in Kombination eingesetzt werden. Beispielsweise können digitale Zwillinge ein Data Mining verwenden, um gesammelte Daten zu verarbeiten, und simulieren darüber hinaus Werte, die vom physischen Gegenstück nicht ermittelt werden konnten (Zambal et al. 2017).

Die Inputs, Outputs und Entscheidungsfunktionalitäten der digitalen Zwillinge sind von dem aktuell stärksten Einsatzbereich, der Industrie 4.0 gekennzeichnet, wobei Zusammenhänge und Verständniskonzepte aus der Bildung 4.0 als nahe daran angelehnt betrachtet werden können.

In der Industrie gelten digitale Zwillinge als eine der Schlüsseltechnologien digitaler und intelligenter Produktionsprozesse und entwickeln sich zu einem neuen Forschungsschwerpunkt der Industrie 4.0 in den Bereichen Fertigung, Betrieb und Wartung komplexer Systeme (Tao et al. 2018; Qi et al. 2018; Qi et al. 2021; Tao et al. 2019a; Richter et al. 2022). Mit den vielfältigen modellierten oder sensorbasierten Datenstrukturen und deren Verarbeitung ist es möglich, die Wertschöpfungskette vollständig vom Design bis zur Realisierung abzubilden. Hierzu sind ständige Interventionen in einem offenen Optimierungskreislauf durch kontinuierlichen Datenfluss vorzunehmen. Die industrielle Verwendung eines digitalen Zwillings auf der Konzeptebene eines digitalen Modells schafft eine virtuelle Umgebung zum Testen bzw. Evaluieren von Prozessen und zur Schulung von Fachpersonal, wodurch beispielsweise notwendige physische Investitionen eingespart und Gefahrenpotenziale minimiert werden können (Bamberg et al. 2020). Hierbei spielt die Einbindung von digitalen Zwillingen als Visualisierung bzw. Repräsentation in Virtual oder Augmented Reality-Anwendungen eine Rolle und öffnet die Möglichkeit, beispielsweise Konzepte in einer interaktiven und immersiven Umgebung zu erkunden sowie

Anlagenführungen zur Inbetriebnahme, zu Schulungen oder Planungszwecken anzubieten (Harke 2022). Digitale Zwillinge gehören so zum Inbegriff der modernen Industrialisierung und ermöglichen den Weg zur Realisierung von einer intelligenten industriellen Anlagenplanung bis hin zur intelligenten Fertigung mit vorausschauenden Wartungsoptionen, Echtzeitüberwachung, Prozessoptimierungen bzw. -vorhersagen und Schulungszwecken (Prostep 2022; Aucotec 2022).

Die gezeigten Anwendungsfälle, Perspektiven und positiven Effekte aus den Schulungsszenarien der Industrie wecken das Interesse, die Lehre als Zweck eines digitalen Zwillings zu fokussieren und die vielfältigen Potenziale in Bildungsprozessen zu analysieren. Dies steht in der Abhängigkeit zu dem jeweils formulierten Bildungsziel und dem geforderten Kompetenzerwerb der Lernenden im Umgang mit dem digitalen Zwilling. Im folgenden Kapitel wird hierzu verdeutlicht, dass digitale Zwillinge als Bildungstechnologie eine fächerspezifische sowie fächerübergreifende Nutzung mit unterschiedlichen Anspruchsniveaus bieten und das Feld Learning-Analytics erweitern.

4. Digitale Zwillinge als Bildungstechnologie und deren Potenziale in der naturwissenschaftlichen Bildung

Die Entwicklung von Bildungstechnologien zielt darauf, technologiegestützte Lernwerkzeuge zu schaffen, welche die mentalen Fähigkeiten und Kapazitäten der Lernenden berücksichtigen (Koc-Januchta et al. 2022) und deren Wahrnehmung der physischen Welt durch ergänzende Elemente der virtuellen Welt verbessern. Neue Bildungstechnologien erweitern so das Spektrum der immersiven technologischen Schnittstellen, die als erweiterte Realität (XR) bezeichnet werden (Pegrum 2021) und neue Interaktion mit der Umwelt – bzw. der Interaktion der Umwelt mit uns, den Lernenden – ermöglichen (Schneider et al. 2015). Daher spielen Display- und Sensortechnologien eine Schlüsselrolle in der Entwicklung von Bildungstechnologien.

4.1 Digitale Zwillinge als Displaytechnologien

Displaytechnologien, von beispielsweise analogen Büchern und Modellen, digitalen elektronischen Bildschirmgeräten bis hin zu AR/VR-Displaytechnologien, ermöglichen die visuelle Darstellung, Integration und Präsentation von Daten oder Bildern (Börner, Kalz, und Specht 2013). Die Kombination von unterschiedlichen Darstellungsweisen zu einem Bezugsobjekt innerhalb oder mit unterschiedlichen Displaytechnologien wird unter dem Begriff multiple externe Repräsentationen (meR) zusammengefasst, z. B. die typische Text-Bild-Kombination in Schulbüchern (Krey und Schwanewedel 2018). Das bedeutet, dass die Lernenden auf Informationen zu einem Bezugsobjekt aus mehr als einer virtuellen oder realen Repräsentation durch

Messdaten, Texte, symbolische abstrakte Elemente, Modelle oder physische Objekte zugreifen (ebd.). Dabei ist es möglich, dass die Repräsentationen inhaltlich für sich stehen, aber trotzdem einen Sachverhalt vermitteln, indem sie unterschiedliche Inhalte bzw. Aspekte dazu transportieren. Die Besonderheit von meRs liegt in der unterschiedlichen Zugänglichkeit einzelner Aspekte, wobei hinsichtlich der Repräsentationen Wechselwirkungen zu dem jeweilig präsentierten Inhaltsaspekt bestehen. Dies zeigt sich besonders anhand der Interpretation von linearen mathematischen Zusammenhängen experimenteller Daten in einer Messtabelle bzw. im Diagramm, wobei in diesem Fall die grafische Darstellung als eine bessere Interpretationsgrundlage dient. Ändern sich die zu betrachtenden Aspekte, kann auch die Darstellung der Messdaten in einer Messtabelle bevorzugt werden (ebd.).

Hierbei wird besonders deutlich, dass meRs nicht nur Darstellungsmittel sind, sondern auch als Erkenntnismittel dienen. Die sich ergänzende Kombination von Repräsentationen ist für Lernende grundlegend, förderlich und vereinfacht den Aufbau von konzeptuellem Verständnis zu, Umgang mit und Kommunikation über die dargestellten naturwissenschaftlichen Sachverhalte (Krey und Schwanewedel 2018; Sass et al. 2012; Herrlinger et al. 2017; Lemke 2004; Nitz et al. 2014). Aus der Kombination von Repräsentationen verdichten sich die wissenschaftlichen Ergebnisse, wodurch neue Interpretationsmuster in den dargestellten Daten bzw. komplexe Zusammenhänge deutlicher werden (Krey und Schwanewedel 2018; Rheinberger 2006). Die Bedeutung von meRs beim MINT-Lernen ist fundiert in der Literatur beschrieben (Sass et al. 2012; Tytler et al. 2013). Für das Lernen mit multiplen externen Repräsentationen wurde von Ainsworth (1999 und 2006) ein *Design, Functions, Tasks (DeFT)-Rahmen* entwickelt, welcher drei Kernfunktionen für das Lernen mit meRs identifiziert, die für die Effektivität im Sinne der Unterrichtsqualität von meRs erfüllt sein müssen (Krey und Schwanewedel 2018; Ainsworth 2006):

- *Ergänzungsfunktion*: Darstellung von Informationen in sich ergänzenden Repräsentationen ohne oder mit partieller inhaltlicher Redundanz zwischen den einzelnen Repräsentationen zur Informationsverarbeitung; Anpassung des Lernangebots an individuelle Bedürfnisse und Lösungsstrategien der Lernenden. Beispielsweise können redundante Informationen in unterschiedlichen Repräsentationsformen (z. B. depiktional, deskriptional) in einem Text und einem Bild dargestellt sein, um die Komplexität einer integrierten Darstellung zu vermeiden oder Informationen ohne Redundanz um unterschiedliche Inhalte in den einzelnen Repräsentationen (z. B. Bild und Text) zu einem Sachverhalt (oder Aspekte davon) zu zeigen (Krey und Schwanewedel 2018).
- *Einschränkungsfunktion*: Gegenseitige Beeinflussung der Nutzung, Interpretation und Spezifizierung der beteiligten Repräsentationen. Ein Beispiel hierzu ist, wenn die Vertrautheit mit einer Repräsentation bei der Interpretation und Deutung einer anderen unbekannteren Repräsentation unterstützend wirkt. Weiterhin

zeigt sich die Einschränkungsfunktion darin, dass beispielsweise eine Information zu einer Repräsentation (z. B. verbalsprachliche Beschreibung im Text) durch eine andere (z. B. bildliche Repräsentation) spezifiziert werden kann (Ainsworth 2006).

- *Konstruktionsfunktion*: Erleichterung der Bildung von tieferen Wissensstrukturen durch die Integration, Abstraktion oder Erweiterung verwandter Informationen aus verschiedenen Repräsentationen. Hierzu nennen Krey und Schwanewedel (2018, 167), dass bei einer «Abstraktion der Vergleich mehrerer Repräsentationen zum Erkennen eines zugrunde liegenden Prinzips führt», und beispielsweise bereits vorhandene Fertigkeiten und Fähigkeiten zur Interpretation einer Repräsentationsform durch die Übertragung dieser auf eine andere Repräsentationsform erweitert werden.

Digitale Zwillinge können als neue visuelle und dynamische Darstellung auf Displaytechnologien die Serie der meRs ergänzen. Mit der Übertragbarkeit der drei genannten Kernfunktionen für das effektive Lernen mit meRs auf das Konzept der digitalen Zwillinge können erste fundierte didaktisch-methodische Potenziale zum Einsatz digitaler Zwillinge in der naturwissenschaftlichen Bildung herausgestellt werden. Digitale Zwillinge erfüllen in vielerlei Hinsicht die Funktion als Ergänzung. Neben der visuellen Ergänzung zu einem realen Gegenstück – beispielsweise als 3D-Modell im digitalen Raum – sind innerhalb der digitalen Darstellung wiederum sich ergänzende Darstellungsweisen ohne oder mit inhaltlicher Redundanz möglich. So können ergänzende Informationen wie Schaltpläne, technische Zeichnungen der Bauteile oder visuelle bzw. textbasierte Informationen zu Prozessabläufen, die das reale Gegenstück und seine Funktion beschreiben, durch die zusätzlichen meRs die Darstellung innerhalb des digitalen Zwillings anreichern. Digitale Zwillinge verdichten so den Informationsgehalt des Lernangebots. Durch die vielfältig integrierten meRs im digitalen Zwilling können individuelle Bedürfnisse (z. B. Neigungen, Vorlieben, Routinen) und bevorzugte Lern- bzw. Lösungsstrategien der Lernenden angesprochen werden. Daher bietet die Vielfalt eine Variabilität zur didaktisch-methodischen Gestaltung des Spannungsfelds *Lerngegenstand, Lernende und Lehrende*.

Die Einschränkungsfunktion ist durch die Interaktionsmöglichkeiten im digitalen Zwilling erfüllt. Die digitalen Repräsentationen im digitalen Zwilling können hierzu interaktiv vom User gesteuert werden, z. B. Ein- und Ausblenden, hinein- oder herauszoomen bzw. ähnliche Einstellungen zur Visualisierungsvariation der Displaytechnologie. Die Dynamik in der Gesamtheit aller Darstellungen im digitalen Zwilling soll dazu führen, dass der reale Lerngegenstand und dessen Funktion vollständig abgebildet werden können. Hierbei können die spezifizierten Darstellungsweisen

der meRs im digitalen Zwilling je einen Aspekt des realen Gegenstücks näher verdeutlichen, sich untereinander ergänzen, in Kombination neue Zusammenhänge darstellen und so neue Gedankenstrukturen zur Wissenskonstruktion zulassen.

Gleichzeitig ist auch so die Konstruktionsfunktion einer meR erfüllt, um vertiefende Wissensstrukturen durch den Einsatz von digitalen Zwillingen aufbauen zu können. Die Möglichkeit in einem digitalen Zwilling, den realen Gegenstand durch digitale visuelle meRs zu erweitern und hierbei spezifische und abstrakte Darstellungen zu wählen, erweitert die Zugänge zur Informationsverarbeitung des Lerninhalts. Weiterhin ermöglichen digitale Zwillinge einen Raum, in dem Grenzfälle erfahrbar gemacht werden können. Hierdurch wird das Spektrum an greifbaren Erfahrungen mit dem realen Objekt im digitalen Raum – ungehindert von Sicherheitsaspekten oder hohen Kosten – erweitert und können vertiefend die Lerninhalte repräsentiert werden. Digitale Zwillinge sind so neben dem reinen Darstellungsmittel auch Erkenntnismittel, indem Prozesse, Abläufe und Zusammenhänge visualisiert werden können, die neue Erkenntnisaussagen über das reale Gegenstück erlauben.

Hierbei sind besonders Bezüge und die Potenziale von digitalen Zwillingen als meR in der naturwissenschaftlichen sowie berufsbezogenen Bildung aus konstruktivistischer Perspektive deutlich. Die Vermittlung von reinem Fachwissen ist dagegen weniger zielführend, um reflektierte Kompetenzentwicklung und Selbständigkeit im Arbeits- und Handlungsprozess zu fördern. Digitale Zwillinge sind Test- und Erkenntnisumgebung zugleich. Hierbei ermöglichen digitale Zwillinge im Kontext des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses, Experimente zu entwerfen, Hypothesen zu überprüfen und zu diskutieren. Um komplexe naturwissenschaftliche Zusammenhänge zu verstehen, ist die Betrachtung von mehr als nur einer fachlichen Annahme, basierend auf einer visuellen Darstellung, als Interpretationsgrundlage notwendig. Diese Vielfalt an Perspektiven kann in einem digitalen Zwilling als Displaytechnologie implementiert und visualisiert werden. Mit dem digitalen Zwilling kann so die Betrachtung von mehr als nur einer Perspektive zu dem Lerngegenstand individuell gewählt werden, wobei diese Kombination von inhaltlich redundanter oder spezifizierter Darstellungen den realen Lerngegenstand mit relevanten Informationen anreichern und vielschichtig erlebbar machen.

Mit der Verortung des Zwillings im digitalen Raum sind demnach zusätzlich die Bedingungen zur Orts- bzw. Zeitunabhängigkeit im Bereich des Remote-Learnings umsetzbar. Digitale Zwillinge zeigen in diesem Bereich schon ihre didaktisch-methodischen Potenziale als meR und sind bereits in verschiedenen Lernplattformen verortet (Xie et al. 2021; Sepasgozar 2020). Hierbei können digitale Zwillinge in synchrone und asynchrone Lehr-Lern-Szenarien als meR implementiert sein (Xie et al. 2021). Im synchronen Modus ist es möglich, dass Schüler:innen an einer Live-Demonstration am realen Objekt, beispielsweise an einem realen Experiment, teilnehmen. In diesem Fall befinden sich alle daran Beteiligten (Lehrkräfte, Schüler:innen)

zur selben Zeit im selben virtuellen Raum. Im asynchronen Modus erlauben Zeit- sowie Ortsunabhängigkeit die Flexibilität. Schüler:innen greifen auf einen vorher konstruierten digitalen Zwilling zu, können damit interagieren und im Falle eines Experiments dieses durchführen, analysieren und abspeichern. Die Interaktionsmöglichkeiten im virtuellen Raum erweitern das Demo-Experiment im realen Raum, wodurch Wissensstrukturen vertiefend – im Sinne der konstruktivistischen Theorien und des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses – entwickelt werden (ebd.). Im Fall von Experimenten erweitern digitale Zwillinge authentische experimentelle Inhalte, die einen Blick über den Lehrplan hinaus ergänzen. Darüber hinaus ermöglichen sie die Durchführung von chemischen Experimenten trotz mangelhafter Ausstattung und Materialien (ebd.). Weiterhin sind Virtualisierung und Verlagerung der meist sehr teuren Experimentierapparaturen und Materialien in den digitalen Raum eher mit geringeren Kosten verbunden. Die Vervielfältigung des digitalen Zwillings auf einem smarten Endgerät ist kostengünstiger, bietet jedoch weiterhin den Schüler:innen die Möglichkeit, an einem praxisnahen naturwissenschaftlichen Unterricht teilzuhaben. Xie et al. zeigen in ihrer Publikation mehrere Beispiele auf, welche online zu Verfügung stehen und Einblicke in die Implementierung von digitalen Zwillingen als synchrone und asynchrone Lehr-Lern-Szenarien als meR geben.

Zusammenfassend lässt sich also die Aussage treffen, dass digitale Zwillinge das Profil einer Displaytechnologie als multiple externe Repräsentation im Kontext des MINT-Unterrichts und als effizientes Lehr-Lern-Element im Remote-Learning beispielsweise in online Lernplattformen zeigen.

4.2 Digitale Zwillinge als Sensortechnologien

Sensortechnologien hingegen ermöglichen die Entwicklung von Echtzeit-Informationssystemen und dienen hierbei der intelligenten Erweiterung klassischer Objekte in digitalen Umgebungen. Alltägliche Gegenstände können als Sensor- und Tracking-Objekte dienen und intelligente Fähigkeiten besitzen. Im Bereich <Smart Cars> und <Connected Car-Apps> helfen beispielsweise Ultraschallsensoren bei dem Einparken. Dazu übermitteln die Sensordaten in Echtzeit den aktuellen Stand der Parkposition und können diese Informationen an einen Parkassistenten weiterleiten, der wiederum in das Parkgeschehen direkt eingreifen oder die Person am Steuer durch Anzeige auf einem Display oder mit einem akustischen Signal warnen kann.

Ein Sensor ist definiert als ein Gerät, das eine physikalische Eigenschaft erkennt oder misst und diese aufzeichnet, anzeigt oder auf andere Weise darauf reagiert (Schaumburg 2013). Auf Bildungsprozesse bezogen ermöglichen Sensoren die Erfassung vielfältig beobachtbarer und messbarer Ereignisse im Lernprozess, im Verhalten des Lernenden und im Lernkontext, beispielsweise welche Bereiche, für wie lange oder in welcher Reihenfolge eine Lernaufgabe, Abbildungen oder die

Konstruktion und Messungen an einer Experimentierapparatur bearbeitet wurden. Die Verknüpfung von Sensoren mit Softwarekomponenten erlaubt die Datenaufnahme, -analyse und die Präsentation der Ergebnisse. Auf der Grundlage der gesammelten und analysierten Daten können Aktionen beschlossen werden, die das Lernen unterstützen. Zu den Aktionen zählen beispielsweise eine zusätzliche Einblendung von relevanten Informationen zur Leistungsunterstützung, Analyse und Kontexterkennung. So können sensorbasierte Plattformen als Lernwerkzeuge fungieren (Geuer et al. 2023).

Auf der Definitionsebene «digitaler Zwilling» erfordert die automatisierte Echtzeitdatenübertragung durch cyber-physikalische Verknüpfungen die Verwendung eines oder mehrerer Sensoren, um kontinuierlich Daten von dem realen Gegenstück zu sammeln, zu verarbeiten und im digitalen Zwilling abzubilden (Xie et al. 2021). Mit der Sensortechnologie führt eine Zustandsänderung des physischen Objekts so direkt zu einer Zustandsänderung des digitalen Objekts und umgekehrt wodurch die bidirektionale Kommunikation ermöglicht wird. Die Umsetzung eines mit Sensortechnologien verknüpften und erweiterten Konzepts eines digitalen Zwillings ist obligatorisch für die Verwendung von digitalen Zwillingen als umfassendes Lern- sowie Analysewerkzeug. Die Kombination von Sensortechnologien in reale Objekte verleiht dem Konzept Intelligenz und bildet gemeinsam die sensorbasierte Plattform mit vielfältigen Elementen an Visualisierungs- und Feedbackmöglichkeiten im digitalen Zwilling.

Weiterhin sind Sensoren in ingenieur- und naturwissenschaftlichen Laboren als Messinstrumente unverzichtbar, um physikalische oder chemische Veränderungen zeitlicher und prozessbestimmender Parameter verfolgen, analysieren und diskutieren zu können. In der MINT-Bildung finden Sensoren – wie auch eine Vielzahl an Low-Cost-Sensorik – bereits Einsatz (Zucker et al. 2008), um beispielsweise Messungen von chemisch-physikalischen Parametern wie pH-Wert, CO₂-Gehalt, Leitfähigkeit oder Temperaturen durchzuführen. Sensoren als Messinstrument zu chemisch-physikalischen Parametern zwischen realem System und digitalem Zwilling ermöglichen die Funktion des digitalen Zwillings als Erkenntnismittel im naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozess und eröffnen so eine weitere gewinnbringende Potenzialebene im Lehr-Lernprozess. Die digitale Repräsentation der Echtzeitdaten im digitalen Zwilling spiegelt den aktuellen Zustand mit aktuellen Messwerten oder die Einstellung der Parameter und deren Effekte auf die Messgrößen wider. Die Visualisierung dieser Daten kann vielfältig im digitalen Zwilling umgesetzt werden, beispielsweise direkt als sichtbare Veränderung im 3D-Modell, im Schaltplan, in Prozessskizzen oder als visuelles Overlay am realen Objekt in einem videobasierten digitalen Zwilling. Mit den Daten können so Einflussfaktoren der Parametereinstellungen bzw. Handhabungen am realen Objekt visualisiert werden. Diese bringen wiederum eine analytische Möglichkeit mit, um Aussagen über

die Prozesse am realen Objekt und deren Optimierungsmöglichkeiten zu treffen. Die Echtzeitdaten können ebenso als Datenpool dienen, um diese im Nachgang auszuwerten, Auswirkungen auf Veränderungen zu simulieren, Optimierungsabläufe zu testen und Experimente mit echten Daten ohne automatisierte Datenübertragung vom digitalen Zwilling auf das reale Objekt durchzuführen. Beispielsweise sind hierzu Simulationen von Experimenten mit nicht realistischen, aber denkbaren Versuchsparametern oder unter veränderten Umgebungsfaktoren zu nennen, die in der Realität nicht ausführbar sind und mithilfe des digitalen Zwillings wichtige Erkenntnisse im geschützten Raum liefern.

Wird im Gesamtkontext zur Datenübertragung auch der Übertragungsweg vom digitalen Zwilling zum realen Objekt bedacht, kann der digitale Zwilling als Steuerungseinheit dienen. Ausserdem können die im digitalen Zwilling simulierten und konstruierten Änderungen übertragen, neue Echtzeitdaten von dem realen Objekt zurückgespiegelt, verarbeitet, wiederum analysierend ausgewertet und in einer erneuten Reflexionsschleife neu überdacht werden.

Der digitale Zwilling trifft so den Kerngedanken der konstruktivistischen Didaktik als naturwissenschaftliches Erkenntniswerkzeug, welches das wissenschaftspropädeutische Arbeiten mit dem aktiven Konstruieren von Wissensstrukturen aus verschiedenen Perspektiven fokussiert (Piaget 1977; Möller 2001). Die aktive Konstruktion von Wissen mithilfe eines digitalen Zwillings kann durch das aktive Herstellen eines digitalen Zwillings von einem realen Objekt oder das Konstruieren eines Prozessvorgangs mit dem digitalen Zwilling als Produkt des Lernprozesses ergänzt werden. Inspiriert von dem konstruktivistischen Gedanken wird aufbauend dazu deutlich, dass das wissenschaftliche Lernen mit digitalem Zwilling auch von den psychologischen und kognitiven Effekten des Konstruktivismus profitiert (Papert 1986; Papert 1991). In Abgrenzung zum Konstruktivismus betrachtet der Konstruktivismus zusätzlich das aktive Herstellen (Konstruieren) eines Produkts im Lernprozess. Papert beschreibt in seiner Theorie zum Konstruktivismus die ergänzende Rolle der realen Konstruktionen in der Welt als Stütze für die mentalen Konstruktionen im Kopf als lernwirksamen Effekt. Als Beispiel nennt der Autor das Abmessen der Zutatenmengen beim Kuchenbacken, das Bauen mit Legosteinen oder das Arbeiten mit Computerprogrammiersprachen (Papert 1994; Schladitz Del Campo 2004).

Echtzeitdaten lassen nicht nur Interpretations- und Optimierungsansätze, beispielsweise hinsichtlich Prozessabläufen, Zuständen und Konfigurationen am realen Objekt zu, sondern auch analytische Möglichkeiten im Spannungsfeld von Lerngegenstand, Lehrenden und Lernenden. Die Echtzeitdaten können grundlegend als ganzheitliche Artefakte zur diagnostischen Beurteilung des Spannungsfeldes bzw. der daran Beteiligten, im Nachgang an den Handlungsprozess oder für eine prognostische Beurteilung während des Handlungsprozesses dienen (Xie et al. 2021). Geuer et al. (2023) setzen mit der Entwicklung eines ›Smart Education Photometers‹ (kurz:

SmaEPho) mit digitalem Zwilling einen Meilenstein hinsichtlich der Implementation von Echtzeitdaten und zusätzlich KI-gestützten Monitoring-Ansätzen im digitalen Zwilling für den Bildungsbereich. Das SmaEPho ist ein intelligentes Messsystem mit digitalem Zwilling, welches den Aufbau einer elektrischen Schaltung zu einem Photometer und photometrische Messungen ermöglicht. Der Verlauf des Schaltungsaufbaus und die Messwerte werden sensorbasiert erfasst und direkt an den digitalen Zwilling übertragen, dort entsprechend visualisiert, in Logfiles protokolliert und gespeichert. Der Datenpool spiegelt demnach die individuelle Lösungsstrategie zum Aufbau des elektrischen Schaltkreises wider, dient zur Reflexion und Analyse und ist hierbei wesentlich am Lernprozess der Schüler:innen und am Reflexionsprozess der Lehrkraft beteiligt. Schüler:innen können aus einer datenbasierten Handlungsreflexion Interpretationsansätze zu den negativen bzw. positiven Effekten ihres Handelns am realen Objekt herausstellen und hierbei den Aufbau von Wissensstrukturen intensivieren. Ergänzend hierzu ist mit neuer KI-basierter Technologie und auf der Grundlage von maschinellem Lernen eine automatische Bewertung und sogar personalisiertes formatives Feedback (hier: z. B. bei wiederholten Schwächen im Schaltungsaufbau) im digitalen Zwilling möglich. Das Konzept eines intelligenten KI-gestützten digitalen Zwillings öffnet hierzu vielfältige Forschungsansätze im Bereich «Learning-Analytics» in der Bildungsforschung. Denkbar sind hier zusätzlich KI-gestützte Monitoring-Ansätze im digitalen Zwilling, die auch dem Bereich Scaffolding und Differenzierung zugeordnet werden können.

Während der Beurteilung der Gesamtheit des Spannungsfeldes können die Echtzeitdaten der Lehrkraft eine datenbasierte Interpretationsgrundlage zur systematischen Untersuchung der Unterrichtsqualität, des Unterrichtsverlaufs sein und Ansätze zur Weiterentwicklung liefern. Dabei wird unter anderem auch die Ergänzung zu Videovignetten als weiterem Reflexionstool zur Unterrichtsanalyse deutlich, wenn die spezifischen Daten von den Schüler:innen hinzugezogen werden können, die den Lernprozess dokumentieren. Hierzu ist zusätzlich anzumerken, dass die Echtzeitdaten eine Beurteilung im gegenwärtigen Unterrichtsverlauf zulassen und dass direkte Interventionen möglich sind. Altenrath et al. (2021) stellten hierzu die zunehmende Relevanz einer professionellen Kompetenz von Lehrkräften «zum Lesen, Interpretieren und Nutzen der Datensätze, die sowohl informatisches Wissen als auch gesellschaftlich-kulturelle sowie anwendungsbezogene Perspektiven einbezieht». Die Autor:innen nennen ursächlich dazu den Verlust des Bewusstseins über die Situationsgebundenheit der Daten durch den Transfer von sozialer Wirklichkeit (z. B. Handlung von Schüler:innen) in formalisierte Datenstrukturen (z. B. Logfiles der Echtzeitdaten) und die anschließende Aufbereitung des Datenmaterials. Dies ist zudem allgemein in einer pädagogisch-bildungstheoretischen Diskussion zu digitalen Zwillingen bzw. Generierung und Analyse von Echtzeitdaten zu betrachten.

Zusammengefasst lassen die aufbereiteten Fakten die Aussage zu, dass digitale Zwillinge als (zukünftig KI-basierte) Bildungstechnologie im Spannungsfeld von Lerngegenstand, Lehrenden und Lernenden mit digitaler Echtzeitrepräsentation individueller Lernanlässe (durch Cyber-Physical Interaktionen mit Sensortechnik) agieren und systematische Untersuchungen – wie Wirksamkeiten, Effekte pädagogisch-bildungstheoretische Blickwinkel – im vielfältigen Bereich ‹Learning-Analytics› zulassen. Voraussetzung sind hierzu die professionellen Kompetenzen der Lehrkräfte zum sensiblen Umgang mit Daten und ihrer Interpretation.

4.3 Digitale Zwillinge mit cyber-physikalischen Elementen

Aktuelle Entwicklungen von digitalen Zwillingen im Bildungskontext in Kombination mit cyber-physikalischen Elementen werden in Cyber-Physical-Human-Systemen (CPHS) und Digital Twin Campus-Systemen (DTCS) umgesetzt. In der Definition eines CPHS verwischen die Grenzen zwischen der physischen und der digitalen Welt, indem komplexe Interaktionen Mensch, physisches System und Cybertechnologien miteinander verbinden (Yildiz 2020; Annaswamy und Yildiz 2021; Lamnabhi-Lagarrigue et al. 2017; Trentesaux und Karnouskos 2022). Aktuelle Anwendungsfelder finden sich insbesondere in Bereichen der Industrie 4.0 (Monostori 2014; Pacaux-Lemoine et al. 2017).

Bei der Übertragbarkeit von Entwicklungen in der Industrie 4.0 auf Bildungsprozesse ist, wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, die Diskussion des Übertragens von menschlichem Handeln, sozialen Wirklichkeiten oder Lernprozessen in Datenstrukturen und der anschließenden Aufbereitung des Datenmaterials mit einem pädagogisch-bildungstheoretischen Blickwinkel kritisch zu betrachten. CPHS ist ein aufstrebender Bereich, in dem die Kombination von Mensch und digitalem Zwilling als visuelle Repräsentationsebene auch als moderne Bildungstechnologie Potenziale aus technologischer Perspektive finden kann. Hierbei können personalisierte Lernmodelle als CPHS fungieren, die auf KI und digitalen Zwillingen basieren (Furini et al. 2022). Diese Modelle können sich positiv auf die Gesamtqualität des Lehr-Lernprozesses auswirken und haben das Potenzial für tiefgreifende soziale Auswirkungen (Screpanti et al. 2022). Beispielsweise können CPHS ein dynamisches Datenkonstrukt aus manuellen und automatisierten Datenflüssen bilden, die ein lebendiges virtuelles Modell des menschlichen Systems (Lernende) darstellen, womit auch das enge Konzept der digitalen Zwillinge einbezogen wird. Der kontinuierliche bidirektionale Datenfluss zwischen der virtuellen Darstellung des Menschen und dem realen Menschen ist von grundlegender Bedeutung, um die Kombination von CPHS und digitalem Zwilling zu ermöglichen (Fuller et al. 2020). Das digitale Abbild kann aus persönlichen Daten (Schulabschluss, Noten, Lernzeiten), Daten zu schulischen Verhaltensmerkmalen, Daten zu Interaktionen mit dem Lehrgegenstand oder

auch Konsumverhalten von Lehrmaterialien mithilfe von cyber-physikalischen Interaktionen und Sensoren erstellt werden (Screpanti et al. 2022). Informationen zu relevanten Variablen im Lehr-Lernprozess können durch neuartige Echtzeittechniken zur Überwachung der Schüler:innen während ihrer Aktivitäten über einen automatisierten Datenfluss aufgenommen werden. Die Analysen zur Identifizierung des menschlichen Verhaltens in (Quasi)-Echtzeit im Data-Mining-Prozess (Klassifizierungsalgorithmen, Clustering-Algorithmen, Algorithmen zur Erkennung von Ausreißern) können entsprechende Handlungsentscheidungen, Möglichkeiten zur Optimierung des Lernprozesses oder des Bildungsmaterials im digitalen Zwilling vorgeschlagen und eventuell Wissenslücken reflektiert werden (ebd.). CPHS können ebenso zur Ermittlung des Lernverhaltens der Schüler:innen und zur Unterstützung des Bewertungs- und Feedbackprozesses der Lehrkräfte eingesetzt werden (Madini et al. 2018). Hierbei ist es wichtig, dass der Data-Mining-Prozess für die Lehrkräfte offen ist, um die Ergebnisse mit pädagogischem Fachwissen zu kombinieren, zu reflektieren, zu überarbeiten und zu interpretieren (Screpanti et al. 2022; Jormanainen und Sutinen 2012). Die Anwendung von digitalen Zwillingen im Bildungsbereich basiert auf Big-Data-Technologien, um die Entwicklung des Lehr-Lernprozesses auf vielfältigen Ebenen zu fördern. Werden die einzelnen CPHS zusammengefasst, entstehen Konzepte, wie DTCS (gezeigt in Tong et al. 2022) oder Classroom Digital Twins (CDT) (gezeigt in Ahuja et al. 2021). Diese können als Werkzeug zur Datensammlung und Data-Mining-Prozessen fungieren, um die Repräsentation und Interpretation der Daten aus dem komplexen physischen Raum des kompletten Campussystems oder Kurs/Klassensystems in der virtuellen Welt durch einige grundlegende Data-Mining-Algorithmen zu erreichen.

Individuelles und personalisiertes Lernen mit den Konzepten CPHS, DTCS oder CDT im Zuge der digitalen Transformation baut auf den Säulen digitale Zwillinge und künstliche Intelligenz auf und kann einen Zusammenhang neben dem SDG 4 ‹Qualitativ hochwertige Bildung› zu SD10 ‹Verringerung der Ungleichheit› herstellen (United Nations 2020; Furini et al. 2022). Hierzu zählt ebenso, dass digitale Zwillinge, in Konzepten des CPHS, DTCS oder CDT als Plattform zur beruflichen (Weiter-)Entwicklung von Lehrpersonen genutzt werden können, um beispielsweise zur Entwicklung ihrer Reflexionskompetenz beizutragen (Madini et al. 2018). Zusammenfassend ergibt sich folglich, dass digitale Zwillinge intelligente digitale Abbilder von gruppenspezifischen (z. B. CDT, DTCS) oder personenbezogenen individualisierten KI-gestützten Lernmodellen (z. B. CPHS) sind.

Generell sind bei der Verwendung von digitalen Zwillingen im Bildungssektor vielfältige datenschutzrechtliche Aspekte anzudenken. Im Zuge einer pädagogisch-bildungstheoretischen Diskussion müssen ergänzend zu dem hier gezeigten technischen Diskurs die grenzenlose Datafizierung und allgemeine Fragen zur Medienpädagogik wie auch beispielsweise zu Datensicherheit, Hintergrund der Entstehung und

Dateninfrastruktur betrachtet werden. Hierzu nimmt der Forschungsbereich *Critical Data Studies* auch in Deutschland zu (Iliadis und Russo 2016) und setzt sich kritisch im Allgemeinen mit den Transformationsprozessen der Digitalisierung und Datafizierung auseinander.

Aus der aufgezeigten technologischen Perspektive finden sich fundierte Annahmen zugunsten der Vorgehensweise, digitale Zwillinge als effektive und zukunftsbedeutende Technologie in der naturwissenschaftlichen Bildung einzusetzen. Weiterhin ist hierzu die Übertragbarkeit von technisch-informatischen Vorgehensweisen auf medienpädagogische Fragestellungen zu diskutieren. Jedoch lässt die facettenreiche didaktisch-methodische Analyse der Kombination von realem Objekt mit Sensortechnologie und intelligentem digitalem Zwilling als Displaytechnologie deren Bezeichnung als innovative Bildungstechnologie zu, welche allerdings ergänzend durch eine bildungstheoretische und datenschutzrechtliche Perspektive zu betrachten ist.

5. Zusammenfassung

Der Beitrag öffnet den facettenreichen Einblick in die Komplexität, Funktionsweisen und Anwendung, aber auch in die vielfältigen didaktischen-methodischen Potenziale von digitalen Zwillingen aus der technologischen Perspektive. Um entsprechend einer qualitativ hochwertigen und zukunftsweisenden Bildung (SDG 4, United Nations 2020) gerecht zu werden, bietet der Einsatz technologischer Innovationen der Industrie 4.0 wie digitale Zwillinge im schulischen Kontext eine Möglichkeit, wodurch zugleich die Formulierung entsprechender Bildungsziele und -perspektiven erforderlich ist. Die Funktionsweisen eines digitalen Zwillings eröffnen den Blick zur Vielzahl von Anwendungen im engen Zusammenhang zu den Schlagwörtern und Technologien wie IoT, künstliche Intelligenz, Cyber-Physical Systeme, smart Sensors, maschinelles Lernen und Data-Mining-Prozesse. Hierzu kann herausgestellt werden, dass digitale Zwillinge das Profil einer multiplen dynamischen externen Repräsentation im Kontext des MINT-Unterrichts aufweisen und vielfältig fungieren. Zusätzlich eröffnet die Verbindung zur digitalen Welt hierzu auch die Möglichkeit, digitale Zwillinge als Lehr-Lern-Element im Remote-Learning, beispielsweise in online Lernplattformen einzusetzen. Darüber hinaus stehen intelligente digitale Zwillinge als zukünftige KI-basierte (Learning-Analytics-)Tools im Lehr-Lernprozess mit digitaler Echtzeitrepräsentation individueller Lernanlässe zur Verfügung. Außerdem gelten erste Entwicklungen hin zu «Classroom Digital Twins» oder «Human Digital Twins» als Basis für gruppenspezifische oder personenbezogene individualisierte KI-gestützte Lernmodelle. Dem Beitrag kritisch zu ergänzen ist die Betrachtung der Übertragung technischer Vorgehensweisen auf menschliche Lernprozesse. Hierzu ist eine vertiefende pädagogisch-bildungstheoretische Reflexion der obigen

technischen Möglichkeiten notwendig, um digitale Zwillinge als Bildungstechnologie umfassend zu diskutieren. Zusammengefasst ist ein digitaler Zwilling mehr als eine reine Repräsentation des realen Systems in der digitalen Welt. Vielmehr eröffnen voranschreitende technologische Entwicklungen neue Möglichkeiten zur Simulation, Reflexion, Optimierung oder didaktisch-methodischen Gestaltung im Spannungsfeld Lerngegenstand, Lernende und Lehrende.

Literatur

- Ahuja, Karan, Shah Deval, Paredy Sujeath, Khakaj Francesca, Ogan Amy, Agarwal Yuvraj, und Chris Harrison. 2021. «Classroom Digital Twins with Instrumentation-Free Gaze Tracking». *Human Factors in Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445711>.
- Ainsworth, Shaaron. 1999. «The functions of multiple representations». *Computers & Education* 33 (2–3): 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9).
- Ainsworth, Shaaron. 2006. «DeFT: a conceptual framework for considering learning with multiple representations». *Learning and Instruction*, 16 (3): 183–98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>.
- Altenrath, Maike, Sandra Hofhues, und Jennifer Lange. 2021. «Optimierung, Evidenzbasierung, Datafizierung. Systematisches Review zum Verhältnis von Daten und Schulentwicklung im internationalen Diskurs». *MedienPädagogik* 44 (Datengetriebene Schule): 92–116. <https://doi.org/10.21240/mpaed/44/2021.10.30.X>.
- Annaswamy, Anuradha, und Yildiray Yildiz. 2021. «Cyber-Physical-Human Systems». In *Encyclopedia of Systems and Control*, herausgegeben von J. Baillieul, und T.Samad. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_100113.
- AUCOTEC. 2022. Pressemitteilung. «Digital Twin: mehr Wissen für effizientere Nutzung. Datenzentriertes Engineering erleichtert Arbeit von Betreibern und Kontraktoren.» https://www.aucotec.com/fileadmin/user_upload/News_Press/Press_Releases/2022/PM-AUC_EB-Alliance_DE_220609.pdf (zuletzt aufgerufen am 29.11.2022).
- Bai, Yan, Yue Wang, und Yanli Wang. 2021. «Application of Smart Factory Digital Twin Technology in the Teaching System of Cultivating Undergraduates' Ability to Solve Complex Engineering Problems». *International Conference on Information Systems and Computer Aided Education*. New York. <https://doi.org/10.1145/3482632.3482667>.
- Bamberg, Andreas, Leon Urbas, Sönke Bröcker, Norbert Kockmann, und Michael Bortz. 2020. «Was den Digitalen Zwilling zum genialen Kompagnon macht». *Chemie Ingenieur Technik* 92 (3): 192–98. <https://doi.org/10.1002/cite.201900168>.
- Baumgartner, Luis, Luca Brägger, Kathrin Koebel, Joe Scheidegger, und Arzu Ço'ltekin. 2022. «Visually annotated responsive digital twins for remote collaboration in mixed reality environments». *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 4: 329–36. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2022-329-2022>.

- Bekker, Anriette. 2018. «Exploring the blue skies potential of digital twin technology for a polar supply and research vessel». In *Proceedings of the 13th International Marine Design Conference Marine Design XIII (IMDC 2018)*, herausgegeben von Pentti Kujala, Liangliang Lu, Chapter 11. London: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780429440533>.
- Börner, Dirk, Marco Kalz, und Marcus Specht. 2013. «Beyond the channel: A literature review on ambient displays for learning». *Computers and Education* 60: 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.06.010>.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Hrsg. 2022. «Digital-Pakt Schule. Das sollten Sie jetzt wissen.» https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/_documents/das-sollten-sie-jetzt-wissen.html (zuletzt aufgerufen am 25.05.2023).
- Ciavotta, Michele, Marino Alge, Silvia Menato, Diego Rovere, und Paolo Pedrazzoli. 2017. «A microservice-based middleware for the digital factory». *Procedia Manufacturing* 11: 931–38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.197>.
- Cortés, Daniel, José Ramirez, Luis Enrique Villagomez, Rafael Batres, Virgilio Vasquez-Lopez, und Arturo Molina. 2020. «Digital pyramid: an approach to relate industrial automation and digital twin concepts». *2020 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. Piscataway, NJ 2020: 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198643>.
- Dalibor, Manuela, Nico Jansen, Bernhard Rumpe, David Schmalzing, Louis Wachtmeister, Manuel Wimmer, und Andreas Wortmann. 2022. «A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins». *Journal of Systems and Software* 193: 111361. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111361>.
- Dong, Rui, Changyang She, Wibowo Hardjawana, Yonghui Li, und Branka Vucetic. 2019. «Deep learning for hybrid 5G services in mobile edge computing systems: Learn from a digital twin». *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18: 4692–4707. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2927312>.
- Ellgass, Wesley, Nathan Holt, Hector Saldana-Lemus, Julian Richmond, Barenji Vatankhah, V. Ali, und Germanico Gonzalez-Badillo. 2018. «A Digital Twin Concept for Manufacturing Systems». *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-87737>.
- El-Mafaalani, Aladin. 2020. *Mythos Bildung. Die ungerechte Gesellschaft, ihr Bildungssystem und seine Zukunft*. Kiepenheuer & Witsch.
- Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day, und Chris Barlow. 2020. «Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research». *IEEE access* 11: 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- Furini, Marco, Ombretta Gaggi, Silvia Mirri, Manuela Montangero, Elvira Pelle, Francesco Poggi, und Catia Prandi. 2022. «Digital Twins and Artificial Intelligence». *Communications of the ACM* 65 (4): 98–104. <https://doi.org/10.1145/3478281>.
- Garetti, Marco, Rosa, Paolo, und Terzi, Sergio. 2012. «Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems». *Computers in Industry* 63 (4): 361–69. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.007>.

- Geuer, Lena, Frederik Lauer, Jochen Kuhn, Norbert Wehn, und Roland Ulber. 2023. «SmaE-Pho–Smart Photometry in Education 4.0». *Education Sciences* 13 (2): 136. <https://doi.org/10.3390/educsci13020136>.
- Glaessgen, Edward H., und D. S. Stargel. 2012. «The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles». 53rd Structures, *Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*. Honolulu, HI, US. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>.
- Grieves, Michael. 2014. «Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication». *White paper* 1: 1–7. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>.
- Harke, Markus. 2022. «Digitale Zwillinge gegen Explosionsgefahr». Blogbeitrag von think ING. <https://www.think-ing.de/irgendwas-mit-technik/digitale-zwillinge-gegen-explosionsgefahr> (zuletzt aufgerufen am 29.11.2022).
- Hellriegel, Jan, und Dino Čubela. 2018. «Das Potenzial von Virtual Reality Für Den Schulischen Unterricht - Eine Konstruktivistische Sicht». *MedienPädagogik: Zeitschrift Für Theorie und Praxis der Medienbildung* (Occasional Papers): 58–80. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2018.12.11.x>.
- Herrlinger, Simone, Tim N. Höffler, Maria Opfermann, und Detlev Leutner. 2017. «When do pictures help learning from expository text? Multimedia and modality effects in primary schools». *Research in Science Education* 47 (3): 685–704. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9525-y>.
- Holler, Manuel, Falk Uebernickel, und Walter Brenner. 2016. «Digital twin concepts in manufacturing industries-a literature review and avenues for further research». *Proceedings of the 18th International Conference on Industrial Engineering (IJIE)*. Korean Institute of Industrial Engineers Seoul, Korea: 1–9. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/18648>.
- Iliadis, Andrew, und Federica Russo. 2016. «Critical Data Studies: An Introduction». *Big Data & Society* 3 (2): 1–7. <https://doi.org/10.1177/2053951716674238>.
- Jormanainen, Ilkka, und Erkki Sutinen. 2012. «Using data mining to support teacher’s intervention in a robotics class». *Proceedings of the 2012 IEEE Fourth International Conference on Digital Game and Intelligent Toy Enhanced Learning*. Washington, DC, USA: 39–46. <https://doi.org/10.1109/DIGITEL.2012.14>.
- Kaivooja, Jari, Knudsen Kuusi, Mikkel Stein, und Theresa Lauraeus. 2019. «Digital Twins Approach and Future Knowledge Management Challenges: Where We Shall Need System Integration, Synergy Analyses and Synergy Measurements?». *International Conference on Knowledge Management in Organizations*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21451-7_23.
- KMK (Kultusministerkonferenz), Hrsg. 2016. «Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz». https://www.kmk.org/fileadmin/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf (zuletzt aufgerufen am 25.05.2023).

- Koc-Januchta, Marta, Konrad Schönborn, Casey Roehrig, Vinay K. Chaudhri, Lena Tibell, und Craig Heller. 2022. «Connecting concepts helps put main ideas together: Cognitive load and usability in learning biology with an AI-enriched textbook». *International Journal of Educational Technology in Higher Education* 19: 11. <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00317-3>.
- Krey, Olaf, und Julia Schwanewedel. 2018. «Lernen Mit Externen Repräsentationen». Springer eBooks: 159–75. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_10.
- Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, und Wilfried Sihn. 2018. «Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification». *IFAC-PapersOnLine* 51, no. 11: 1016–22. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- Lamnabhi-Lagarrigue, Francoise, Anuradha Annaswamy, Sebastian Engell, Alf Isaksson, Pramod Khargonekar, Richard M. Murray, Henk Nijmeijer, Tariq Samad, Dawn Tilbury, und Paul Van den Hof. 2017. «Systems & control for the future of humanity, research agenda: current and future roles, impact and grand challenges». *Annu Rev Control* 43:1–64. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.04.001>.
- Lemke, Jay L. .2004. «The literacies of science». In *Crossing borders in literacy and science instruction: perspectives on theory and practice*, herausgegeben von Saul, E. Wendy, 33–47. Arlington: International Reading Association. <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/694454/12425099/1306520400463/Literacies-of-science-2004.pdf>.
- Lesch, Harald, und Ursula Forstner. 2020. *Wie Bildung gelingt: Ein Gespräch*, wbg Theiss.
- Madni, Azad M., Sievers, Michael und Madni, Carla C. 2018. «Adaptive Cyber-Physical-Human Systems: Exploiting Cognitive Modeling and Machine Learning in the Control Loop». *Insight* 21, no. 3: 87–93. <https://doi.org/10.1002/inst.12216>.
- Möller, Kornelia. 2001. *Konstruktivistische Sichtweisen für das Lernen in der Grundschule?* VS eBooks: 16–31. Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-322-97504-1_2.
- Monostori, Laszlo. 2014. «Cyber-physical production systems: roots, expectations and r&d challenges». *Procedia CIRP* 17: 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- Negri, Elisa, Luca Fumagalli, und Marco Macchi. 2017. «A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-Based Production Systems». *Procedia Manufacturing* 11: 939–48. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.
- Nitz, Sandra, Shaaron E. Ainsworth, Claudia Nerdel, und Helmut Prechtel. 2014. «Do student perceptions of teaching predict the development of representational competence and biological knowledge?» *Learning and Instruction*, 31: 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.12.003>.
- Pacaux-Lemoine, Marie-Pierre, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano-Rey, und Patrick Milot. 2017. «Designing intelligent manufacturing systems through human-machine cooperation principles: a human-centered approach». *Computers & Industrial Engineering* 111: 581–95. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.014>.
- Padovano, Antonio, Francesco Longo, und Letizia Nicoletti. 2018. «A Digital Twin based Service Oriented Application for a 4.0 Knowledge Navigation in the Smart Factory». *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018): 631–36. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.389>.

- Papert, Seymour. 1986. «Constructionism: A new opportunity for elementary science education». Massachusetts Institute of Technology, Media Laboratory, Epistemology and Learning Group.
- Papert, Seymour. 1991. «Situating Constructionism». In *Constructionism*, herausgegeben von Seymour Papert, und Idit Harel. Norwood, NJ: Ablex Publishing Corporation. https://web.media.mit.edu/~calla/web_comunidad/Reading-En/situating_constructionism.pdf.
- Papert, Seymour. 1994. *The Children's Machine: Rethinking School in the Age of the Computer*. Basic Books.
- Pegrum, Mark. 2021. «Augmented Reality Learning: Education in Real-World Contexts». Research-publishing: 115–20. <https://doi.org/10.14705/rpnet.2021.50.1245>.
- Piaget, Jean. 1977. *The Development of Thought: Equilibration of Cognitive Structures*. Viking Press. <https://doi.org/10.3102/0013189X007011018>.
- PROSTEP AG, Hrsg. 2022. *Von der Punktwolke zum 3DigitalTwin: Bestandsanlagen schneller digitalisieren*, PROSTEP AG Whitepapers, Germany. <https://www.prostep.com/downloads/whitepaper/whitepaper-von-der-punktwolke-zum-3digitaltwin-bestandsanlagen-schneller-digitalisieren>.
- Qi, Qinglin, Fei Tao, Tianliang Hu, Nabil Anwer, Ang Liu, Yongli Wei, Lihui Wang, und Andrew Y. C. Nee. 2021. «Enabling technologies and tools for digital twin». *Journal of Manufacturing Systems* 58: 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
- Qi, Qinglin, Fei Tao, Ying Zuo, und Dongming Zhao. 2018. «Digital twin service towards smart manufacturing». *Procedia Cirp* 72: 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>.
- Rheinberger, Hans-Jörg. 2006. *Epistemologie des Konkreten: Studien zur Geschichte der modernen Biologie*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Richter, Jannik et al. 2022. «Digitale Zwillinge in der Bioprozesstechnik – Chancen und Möglichkeiten». *Chemie Ingenieur Technik*. <https://doi.org/10.1002/cite.202200166>.
- Sass, Steffani, Jörg Wittwer, Martin Senkbeil, und Olaf Köller. «Pictures in Test Items: Effects on Response Time and Response Correctness». *Applied Cognitive Psychology* 26, no. 1: 70–81. <https://doi.org/10.1002/acp.1798>.
- Schaumburg, Hanno. 2013. *Sensoren*. Springer.
- Schladitz Del Campo, Vera. 2004. *Konstruktivismus im DAF-Unterricht*. GRIN.
- Schleich, Benjamin, Martin Roth, und Paul Schaechtl. 2022. «Conceptualization and Elaboration of a Teaching Unit on Digital Twins in Geometrical Variations Management». *Procedia CIRP* 114: 221–26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.031>.
- Schneider, Jan, Dirk Börner, Peter Rosmalen, und Marcus Specht. 2015. «Augmenting the Senses: A Review on Sensor-Based Learning Support». *Sensors* 15: 4097–4133. <https://doi.org/10.3390/s150204097>.
- Screpanti, Laura, David Scaradozzi, R.N. Gulesin, und Nicolò Ciuccoli. 2022. «Control Engineering and Robotics since Primary School: An Infrastructure for Creating the Digital Twin Model of the Learning Class». *IFAC-PapersOnLine* 55 (17): 267–72. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.290>.

- Sepasgozar, Samad M. E. 2020. «Digital Twin and Web-Based Virtual Gaming Technologies for Online Education: A Case of Construction Management and Engineering». *Applied Sciences* 10, no. 13: 4678. <https://doi.org/10.3390/app10134678>.
- Tao, Fei, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, und Fangyuan Sui. 2018. «Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94: 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- Tao, Fei, Qinglin Qi, Lihui Wang, und Andrew Y. C Nee. 2019a. «Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison». *Engineering* 5, no. 4: 653–61. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>.
- Tao, Fei, Rui Zhang, und Andrew Y. C. Nee. 2019b. «Background and Concept of Digital Twin». In Elsevier EBooks, 3–28, 2019. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817630-6.00001-1>.
- Tong, Wang-Yu, Youxue Wang, Qinghua Su, und Zhongbo Hu. 2022. «Digital Twin Campus with a Novel Double-Layer Collaborative Filtering Recommendation Algorithm Framework». *Education and Information Technologies* 27, no. 8: 11901–17. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11077-6>.
- Trentesaux, D., und S. Karnouskos. 2022. «Engineering ethical behaviors in autonomous industrial cyber-physical human systems». *Cogn Tech Work* 24: 113–26. <https://doi.org/10.1007/s10111-020-00657-6>.
- Tytler, Russell, Vaughan Prain, Peter Hubber, und Bruce G. Waldrip. 2013. *Constructing Representations to Learn in Science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-6209-203-7>.
- United Nations. 2020. «Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015: Transformation unserer Welt: Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung». February 28, 2020. <https://www.un.org/depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf> (zuletzt aufgerufen am 25.05.2023).
- Uzun, Mevlüt, M. Umut Demirezen, Emre Koyuncu, und Gokhan Inalhan. 2019. «Design of a hybrid digital-twin flight performance model through machine learning». *IEEE Aerospace Conference 2019*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8741729>.
- Wantia, Nils, und Jürgen Rossmann. 2017. «An online task planning framework reducing execution times in industrial environments». 4th *International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. <https://doi.org/10.1109/IEA.2017.7939185>.
- Xie, Charles, Chenglu Li, Xiaotong Ding, Rundong Jiang, und Shannon Sung. 2021. «Chemistry on the Cloud: From Wet Labs to Web Labs». *Journal of Chemical Education*. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00585>.
- Yildiz, Yildiray. 2020. «Cyberphysical human systems: An introduction to the special issue». *IEEE Control Systems Magazine* 40(6): 26–28. https://yildirayyildizcom.files.wordpress.com/2021/08/cyberphysical_human_systems_an_introduction_to_the_special_issue.pdf.

- Yusupbekov, Nadirbek R., F. Abdurasulov, F. Adilov, und Arsen Ivanyan. 2018. «Application of Cloud Technologies for Optimization of Complex Processes of Industrial Enterprises». *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04164-9_112.
- Zambal, Sebastian, C. Eitzinger, Michael Clarke, John Klintworth, und Pierre-Yves Mechin. 2018. «A digital twin for composite parts manufacturing: Effects of defects analysis based on manufacturing data». *16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8472014>.
- Zhang, Hao, Qiang Liu, Xin Chen, Ding Zhang, und Jiewu Leng. 2017. «A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line». *IEEE Access* 5: 26901–26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>.
- Zucker, Andrew, Robert Tinker, und Carolyn Staudt. 2008. «Learning Science in Grades 3–8 Using Probeware and Computers: Findings from the TEEMSS II Project». *Journal of Science Education and Technology* 17 (1):42-48. <https://doi.org/10.1007/s10956-007-9086-y>.

Acknowledgments

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (Projekt U.EDU, Fördernummer: 01JA1916) für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten.