

Digitale Zwillinge: vernetzt, vorausschauend – aber auch nachhaltig?

Kosten und Nutzen einer transformativen Technologie

Kernbotschaften

– Nachhaltiger Nutzen

Digitale Zwillinge bergen bei einem verantwortungsvoll gestalteten Ressourceneinsatz das Potenzial, Nachhaltigkeit zu fördern und Handlungsspielräume effizienter zu nutzen. Sie ermöglichen es Kommunen und Wirtschaft, urbane und industrielle Abläufe besser zu steuern und dadurch beispielsweise die Lebensqualität in Städten und Gemeinden zu erhöhen.

– Strategische Implementierung

Um zu gewährleisten, dass Nachhaltigkeitspotenziale ausgeschöpft werden, müssen Digitale Zwillinge bedarfsorientiert und für einen effizienten Ressourceneinsatz optimiert um- und eingesetzt werden. Standardisierte Datenformate, Schnittstellen und Open Data vereinfachen die Implementierung. Es braucht eine kohärente Strategie, die auch Nebeneffekte auf dem Weg zur Zielerreichung berücksichtigt.

– Gesellschaftliche und ökologische Zukunftsvision

Digitale Zwillinge ermöglichen umfassende Simulationen, die auch soziale und ökologische Aspekte einbeziehen können. So kann klimafreundlicher, resilienter und generationengerechter geplant werden, um aktuellen und künftigen gesellschaftlichen Herausforderungen begegnen zu können.

Szenarien für den Einsatz Digitaler Zwillinge

Um Digitale Zwillinge verstehen zu können, lohnt sich der Blick auf einen Arbeitstag, in dessen Verlauf mit der Technologie ganz konkret Herausforderungen angegangen werden. In den folgenden Szenarien gestalten eine Oberbürgermeisterin und ein Landrat die Transformation.

In Kooperation mit:

| BertelsmannStiftung



Autor*innen:
Simone Kaiser (Fraunhofer
IAO – CeRRI), Jan Quaing
(DBU), Anne-Marie Tumes-
scheidt (Fujitsu), Andreas
Werner (Fraunhofer IAO),
Dr. Ole Wintermann
(Bertelsmann Stiftung)

Wie eine Oberbürgermeisterin Digitale Zwillinge für Stadtentwicklung, Katastrophenschutz und Circular Economy nutzt

8 Uhr: Einsatzplanung zum Zivil- und Katastrophenschutz

Der Tag beginnt mit einer Lagebesprechung im Rathaus. Nach heftigen Regenfällen sind einige Straßenzüge leicht überflutet. Mithilfe des Digitalen Zwillings für Katastrophenmanagement sieht die Oberbürgermeisterin auf einem interaktiven Dashboard aktuelle und prognostizierte Auswirkungen der Niederschläge auf die städtische Infrastruktur. Sie trifft sich mit den Verantwortlichen des Katastrophenschutzes, um Schutzmaßnahmen und Evakuierungspläne für gefährdete Gebiete zu besprechen. Der Digitale Zwilling simuliert Hochwasserentwicklungen, bewertet Schutzmaßnahmen und prognostiziert Evakuierungsrouten, die vor Überflutungen geschützt sind. Mithilfe der Daten kann das Team der Oberbürgermeisterin schnell und koordiniert reagieren.

13 Uhr: Förderung der Circular Economy

Am Nachmittag trifft die Bürgermeisterin auf Vertreter*innen lokaler Produktions- und Entsorgungsbetriebe, um über die städtische Circular Economy zu sprechen. Ein Digitaler Zwilling hält Informationen über Materialien, Verarbeitung und Baupläne von Produkten bereit und simuliert einen automatisierten Demontageprozess für Altgeräte. So werden Materialien effizienter recycelt und über einen integrierten Marktplatz als Sekundärrohstoff in den Kreislauf zurückgeführt. Die Bürgermeisterin schlägt eine Pilotinitiative vor, um den Digitalen Zwilling auch in städtische Bauvorhaben zu integrieren und so die Wiederverwertungsquote bei Baumaterialien zu steigern.

15 Uhr: Unfallrisikoanalyse im Stadtzentrum

Die Bürgermeisterin widmet sich der Verkehrssicherheit in einem stark frequentierten Viertel. Der Digitale Zwilling für Verkehrssicherheitsmanagement hilft ihr und dem Straßenverkehrsamt dabei, historische Verkehrsdaten, Befragungen von Bürger*innen und Infrastruktur auf Unfallrisiken hin zu analysieren. Die Daten zeigen, dass an einigen Kreuzungen die Sicht eingeschränkt ist und Straßenverengungen zu häufigen Beinaheunfällen führen. Die Simulation schlägt Maßnahmen wie Verkehrsspiegel, bessere Beleuchtung und Geschwindigkeitsbegrenzungen vor, die vom Verkehrsamt umgesetzt werden können. Für die langfristige Planung können potenzielle Auswirkungen geänderter Straßenführungen und anderer baulicher Maßnahmen simuliert und bewertet werden.

17 Uhr: Webinar zur klimaresilienten Stadtplanung

Zum Abschluss des Tages nimmt die Bürgermeisterin am Webinar einer EU-Initiative zum Einsatz Digitaler Zwillinge bei Klimaprognosen teil. Sie erfährt, wie der Digitale Zwilling der Erde mit Klimasimulationen die lokale Umweltplanung unterstützt. Inspiriert plant sie, die zur Verfügung gestellten Daten für zukünftige Klimaanpassungsmaßnahmen und Wasserkonzepte in ihrer Stadt zu nutzen.

Ein Landrat optimiert mit Digitalen Zwillingen Wohnraumplanung, Verkehrssicherheit und Bildungsgerechtigkeit

8 Uhr: Lagebesprechung zu städtischen und gesellschaftlichen Herausforderungen

Der Landrat beginnt den Tag mit einer Besprechung zur Unterbringung und Integration von Kriegsflüchtigen. Ein Digitaler Zwilling liefert Echtzeitdaten zur Verfügbarkeit von Wohnraum, Schulen, Beratungsangeboten und anderen sozialen Diensten. Auf einem Dashboard sieht der Landrat, welche Kommune bereits wie viele Personen untergebracht hat und wo zusätzlicher Bedarf an Bildungs- und Gesundheitsangeboten besteht. Das hilft ihm, neue Begegnungsstätten und Sprachlernzentren zu planen.

11 Uhr: (industrielle) Circular Economy und soziale Integration

Der Landrat trifft Vertreter*innen von lokalen Produktions- und Entsorgungsunternehmen sowie Sozialprojekten, um Maßnahmen für mehr Nachhaltigkeit zu besprechen. Ein Digitaler Zwilling zeigt, wie die Rückführung und Wiederverwendung von Altgeräten und Textilien optimiert werden kann. Der Landrat schlägt vor, Upcycling- und Reparaturwerkstätten zu etablieren, die auch auf die Digitalen Zwillinge einiger Produkte zurückgreifen können. Das soll nicht nur die Umwelt entlasten, sondern auch Qualifizierungs- und Arbeitsmöglichkeiten schaffen.

13 Uhr: Verkehrssicherheit

Zur Mittagszeit sind ÖPNV-Abdeckung und Verkehrssicherheit in Gebieten, in denen viele ältere Menschen leben, die Themen. Mithilfe des Digitalen Zwillings für Verkehrsmanagement analysiert der Landrat kritische Stellen ohne Gehwege, fehlende Fußgängerampeln, nicht barrierefreie Zugänge zu Haltestellen und häufige Fußgängerunfälle. Dabei bezieht er den öffentlichen Nahverkehr mit ein. Die Simulation schlägt Maßnahmen wie angepasste Buslinien, sichere Fußwege und Haltestellen mit baulichen Abgrenzungen vor. Die Optimierungen erhöhen die Lebensqualität und das Sicherheitsgefühl.

16 Uhr: Integration und Bildungsgerechtigkeit

In einem Meeting mit Vertreter*innen der Sozialdienste und Bildungseinrichtungen nutzt der Landrat den Digitalen Zwilling zur Analyse von Schul- und Bildungsdaten. Die Simulation zeigt, dass in bestimmten Kommunen höhere Schulabbruchquoten und Defizite bei der sozialen Teilhabe bestehen. Deshalb plant sein Team Mentoring-Initiativen, den Ausbau des Kinder- und Jugendwerks, Maßnahmen zur beruflichen Qualifizierung und Integrationsveranstaltungen, um die Bildungschancen und Integration in diesen Vierteln zu verbessern.

Der Denimpuls im Überblick

Singapur begann 2012 als eine der ersten Städte der Welt, eine digitale Kopie ihrer selbst zu erstellen. Plötzlich konnte sich eine ganze Stadt in ihrem digitalen Spiegelbild analysieren, um Verkehrsströme zu optimieren, Energie zu sparen und die Infrastruktur vorausschauend zu planen. Mehr als 10 Jahre später geht diese Idee eines Digitalen Zwillings über Städte hinaus. Sie ist in der Industrie, Medizin und Energieversorgung angekommen. Aber sind Digitale Zwillinge in der Lage, die Hoffnungen zu erfüllen, die wir in sie setzen? Dieser Denimpuls wirft einen Blick hinter die technologischen Kulissen und diskutiert nicht nur Nutzen, sondern auch Kosten dieser transformativen Technologie.

Die prognostizierten Potenziale sind enorm: Studien gehen davon aus, dass Digitale Zwillinge bis 2030 bis zu 1,2 Billionen Euro zusätzlichen wirtschaftlichen Wert schaffen und die CO₂-Emissionen um 7,5 Gt reduzieren können (Accenture/Dassault Systèmes 2021, S. 17). Das entspricht etwa dem CO₂-Budget, das Deutschland bis 2030 im Rahmen seiner Klimaschutzpläne maximal freisetzen möchte. Intelligenterer Stadtplanung könnte die Lebensqualität in Städten und auf dem Land verbessern. Und für Unternehmen ergeben sich neue Möglichkeiten für Wartung und Betrieb von Maschinen sowie im Bereich der Produktion. Das Projekt DestinE geht sogar so weit, Simulationen und Prognosen der Erde auf Basis eines Digitalen Zwillings zu erstellen. Doch wie jede Technologie muss auch diese bedarfs- und anwendungsorientiert eingesetzt werden, damit der Ressourceneinsatz nicht den Nutzen übersteigt. Wie also können Digitale Zwillinge Nachhaltigkeit fördern und zur Circular Economy beitragen? Was gilt es beim Einsatz Digitaler Zwillinge zu beachten? Wie kann die Politik die Potenziale nutzen, um gesellschaftliche Mehrwerte zu generieren? Zu diesen und weiteren Fragen gibt dieser Denimpuls Anregungen und Handlungsempfehlungen.

Nach einer kurzen Kategorisierung und Beschreibung der Funktionsweise Digitaler Zwillinge wird es um die Potenziale für Städte, Kommunen und Wirtschaft gehen. Das zentrale Thema der Nachhaltigkeit folgt im Anschluss, ergänzt um Aspekte der IT- und Datensicherheit. Konkrete Handlungsempfehlungen und Beispiele aus der Praxis tragen dazu bei, mit diesem Denimpuls die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten vorzustellen.

Digitale Zwillinge: Wie sie funktionieren, was sie können

Das Konzept eines technischen „Zwillings“ existiert seit den 1960er Jahren, als die NASA physische Zwillinge in Form von Nachbauten der Raumfahrzeuge im Apollo-Projekt eingesetzt hat (Rosen et al. 2015, S. 568). Heute gehören zu einem Digitalen Zwilling nach der etablierten Definition drei Bestandteile: ein physisches Element der realen Welt, eine virtuelle, digitale Abbildung davon und die Verbindung beider in Form von Informationen und Daten (Grieves/Vickers 2017). Dabei kommen 3D-Modelle, IoT-Geräte, Netzwerke, Cloud Computing, Künstliche Intelligenz und andere Technologien gemeinsam zum Einsatz. Je nach Komplexität sammelt, analysiert und visualisiert der Digitale Zwilling unterschiedlich viele Daten seines realen Zwillings in Echtzeit (mit einer Verzögerung von Millisekunden bis zu mehreren Minuten). So lassen sich das Verhalten des realen Objektes umfassend verstehen und bessere Entscheidungen für das entsprechende physische System treffen (Abb. 1).

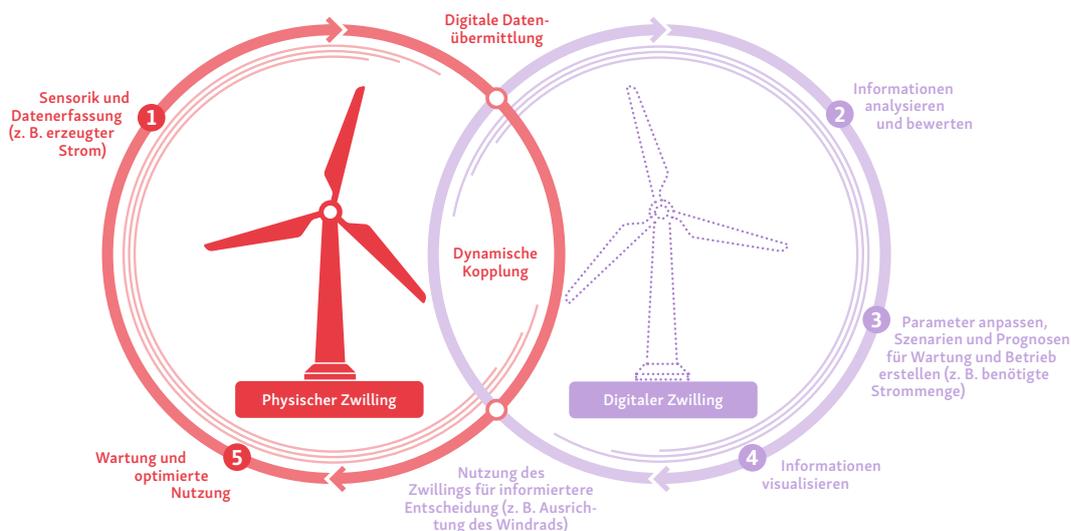


Abb. 1: Funktionsweise und Nutzen eines Digitalen Zwillings am Beispiel eines Windrads.

Fähigkeiten und Prognosekraft eines Digitalen Zwillinges hängen von seinem Reifegrad ab (Arup 2019, S. 104):

Reifegrade Digitaler Zwilling (DZ)

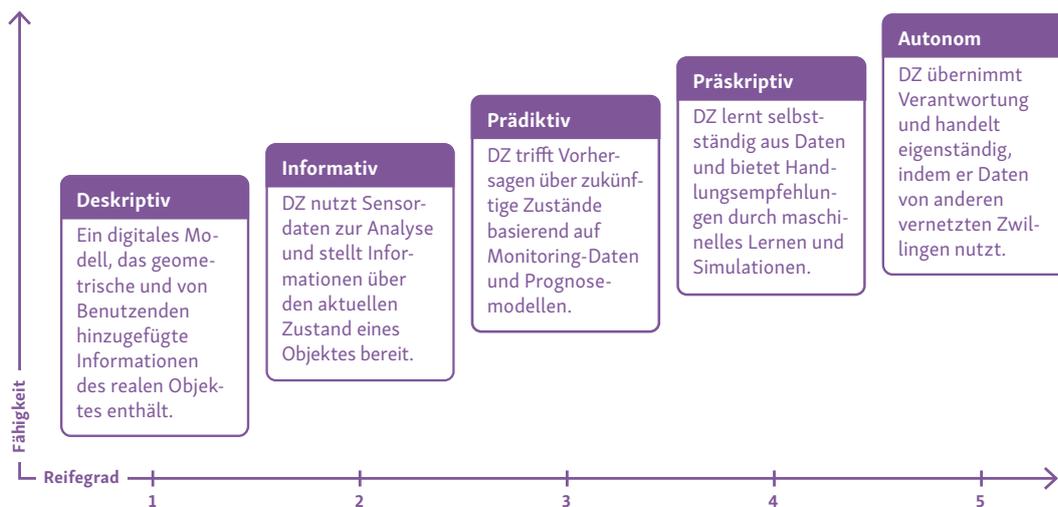


Abb. 2: Je höher der Reifegrad, desto leistungsfähiger der Zwilling.

Urbane Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen

Entlang der Reifegrade verdeutlicht das Beispiel einer mittelgroßen Stadt die Potenziale für Politik und Gesellschaft:

1. **Deskriptive Zwillinge** schaffen ein Abbild der Stadt inkl. Geografie, Gebäude, Verkehrsinfrastruktur und Grünanlagen. Auch Informationen über den ÖPNV, Solaranlagen und Einwohner*innen sind hinterlegt. Sie werden auch Basiszwillinge genannt.
2. **Informative Zwillinge** messen über Sensoren Verkehrsflüsse und von Solaranlagen produzierte Energie und erfassen die Luftqualität und den ÖPNV.
3. **Prädiktive Zwillinge** können Prognosen über Standorte und Ankunftszeiten von ÖPNV-Fahrzeugen erstellen und an Haltestellen anzeigen. Anhand von Wetterprognosen kann geschätzt werden, wie viel Energie Solaranlagen produzieren werden. Simulationen zeigen, wo neue Solaranlagen am effektivsten wären (Baumbestand, Häuserschatten etc.).

4. **Präskriptive Modelle** geben Handlungsempfehlungen für optimierte und effizientere ÖPNV-Linien. Im Energiebereich können sie empfehlen, wann zusätzliche Energieeinspeisung notwendig ist oder wann E-Fahrzeuge am besten geladen werden sollten.
5. **Der autonome Zwilling** würde diese Empfehlungen selbst umsetzen. Er könnte Ampelschaltungen dynamisch je nach Verkehrslage gestalten oder selbstständig elektrische Ladeprozesse bei E-Auto-Flotten steuern.

Sind qualitativ hochwertige Daten vorhanden, können Menschen in Politik und Verwaltung mit solchen Prognosen informiertere Entscheidungen treffen. Weitere Anwendungsbeispiele sind die Vorhersage von Luftschadstoffbelastungen, die interdisziplinäre Planung der städtischen Infrastruktur, Vorhersagen zu Risiken durch bodennahe Windfelder, Einflüsse versiegelter und unversiegelter Flächen und Fassadenbegrünungen, Simulation der Lichtverhältnisse und vieles mehr.

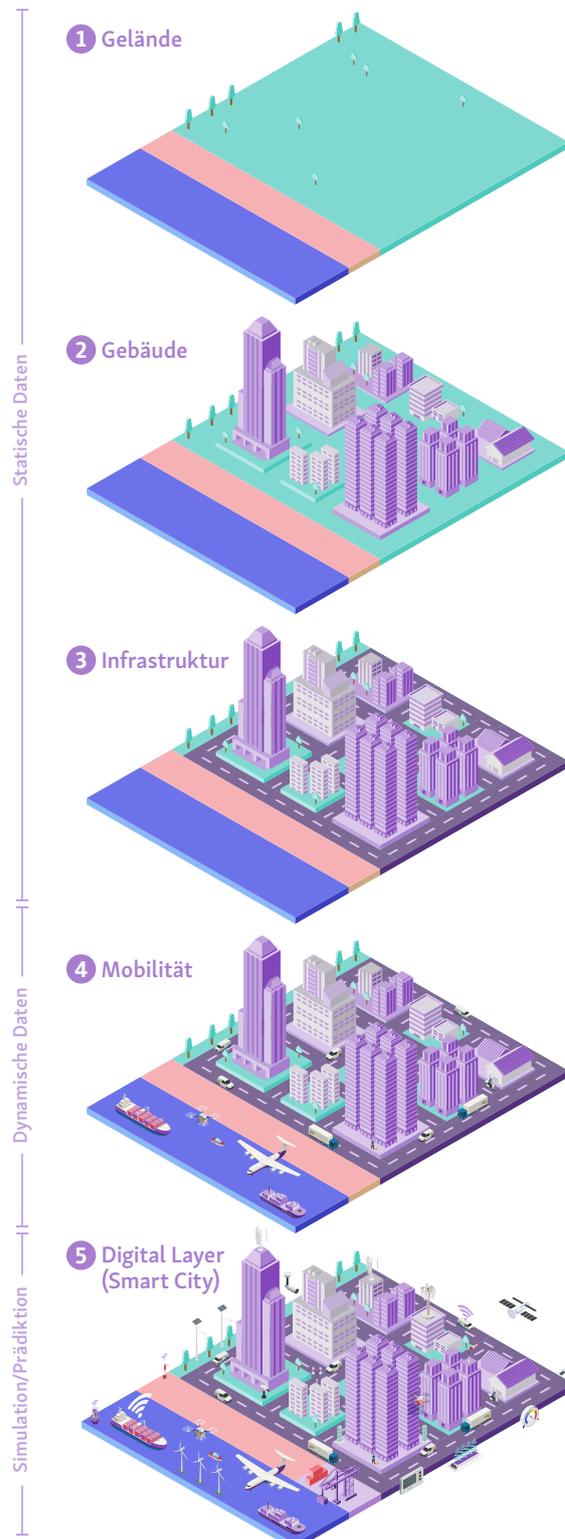


Abb. 3: Schichtweise Entstehung bzw. schichtweiser Aufbau Digitaler Zwillinge.

Case: Katastrophen- und Verkehrssicherheitsmanagement

Fujitsu und Hexagon haben Digitale Zwillinge entwickelt, die Kommunen z. B. beim Katastrophenschutz und bei der Verkehrssicherheit helfen. Es geht darum, aus einer komplexen Datenlage zügig effektive Handlungsanweisungen abzuleiten. So helfen die Prognosemodelle Kommunen dabei, kurzfristig informierter auf Störungen reagieren und langfristig besser planen zu können.

Eine Lösung nutzt Niederschlagsdaten, um Überschwemmungen vorherzusagen und deren Auswirkungen auf die Infrastruktur zu visualisieren. Eine andere Anwendung identifiziert Unfallrisiken auf Straßen, indem sie Verkehrsdaten, Straßengestaltung und andere Faktoren analysiert.

Die Visualisierung von Hochwassergefahren und die Analyse von Unfallrisiken helfen, rechtzeitig Maßnahmen einzuleiten – sei es durch Evakuierungspläne oder neue Verkehrskonzepte. Diese Herangehensweise trägt dazu bei, urbane Räume sicherer und lebenswerter zu gestalten.

Produkt- und Produktionszwillinge in der Industrie

Auch der Industrie bieten Digitale Zwillinge eine Fülle an Möglichkeiten. Neben der oben genannten Einteilung in Reifegrade werden hier folgende Kategorien verwendet (Arup 2019, Jackmuth et al. 2022):

- **Komponentenzwillinge** beschreiben einzelne Bauteile (Schraube, Zahnrad etc.).
- **Objektzwillinge** bilden ganze Gebäude oder Maschinen ab.
- **Systemzwillinge** stellen ein Verkehrsnetz oder eine komplette Produktionsstraße dar.
- **Prozesszwillinge** bilden auch Prozesse und Prozessketten ab.
- **Vernetzte Zwillinge** verschiedener Domänen ermöglichen holistische Einblicke in ganze Wirtschafts- und Gesellschaftssysteme.

Weil Objektzwillinge Fehlfunktionen frühzeitig erkennen, können sie bei Maschinen den Wartungsaufwand um bis zu 30 Prozent senken. Hinzu kommen sinkende Kosten bei Wartung und Inspektion von rund 50 Prozent (Kroker 2019). Vernetzte Digitale Zwillinge können Wissen besser managen und über Unternehmensstandorte hinweg zugänglich machen. Auch sind sie in der Lage, komplexe Planungsprozesse zu steuern: Wie lässt sich ein neues Produkt in kurzer Zeit und dennoch umwelt- und sozialverträglich fertigen? Wie lässt sich das Produkt ressourcenschonend individualisieren? Lagerung, Personalplanung und Vertrieb können ebenfalls Teil einer Simulation sein und optimiert werden. Wichtige gesetzliche Anforderungen wie das Lieferkettensorgfaltsgesetz, dass u. a. Menschenrechte adressiert, können leichter erfüllt werden, besonders dann, wenn Zulieferbetriebe in den Zwilling integriert sind.

Nachhaltigkeit: Eine bessere Welt dank Digitalen Zwillingen?

Um das Nachhaltigkeitspotenzial Digitaler Zwillinge bewerten zu können, muss zunächst geklärt werden, was unter Nachhaltigkeit zu verstehen ist. Eine weit verbreitete Perspektive ist das Triple-Bottom-Line-Modell ⁺ mit den drei Säulen Ökologie, Soziales und Ökonomie. Doch diese Sichtweise greift zu kurz. Gerade in strategischen Prozessen, in die Digitale Zwillinge eingebettet sind, lohnt es sich, auf ganzheitlichere Konzepte wie die Donut-Ökonomie ⁺ zurückzugreifen (Raworth 2017).

Ein Digitaler Zwilling sollte auf verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit einzahlen: vom Respektieren der planetaren Grenzen im ökologischen Sinne über eine zirkuläre und regenerative Wirtschaft bis hin zu sozialer Gerechtigkeit.

Erfolgsfaktoren der doppelten Transformation

Die doppelte Transformation beschreibt zwei Entwicklungen: zum einen die Digitalisierung von Arbeit, Produktion und Alltag, zum anderen die Notwendigkeit, in all diesen Bereichen nachhaltiger zu werden. Doch wie kann sie vorangebracht werden? In der Wirtschaft sind es besonders sogenannte Frontrunner-Unternehmen, die frühzeitig Nachhaltigkeitstrends erkennen und für Innovationen nutzen. In den meisten Fällen sind es inhabergeführte kleine und mittelständische Unternehmen mit entscheidungsfreudigen Führungspersönlichkeiten, die sich für die doppelte Transformation begeistern. Wenn die doppelte Transformation gelingen soll, braucht es aber neben der intrinsischen Motivation von Unternehmer*innen auch Anreize und Regulierungen aus der Politik (Wintermann et al. 2022, S. 33).

⁺ Das ESG-Modell (ähnlich dem Triple-Bottom-Line-ESG-Modell, wobei die Governance die Ökonomie ersetzt) bezieht zwar ebenfalls die Bereiche Ökologie, Soziales, Ökonomie und Governance mit ein, ist jedoch nicht mit der ESG-Regulation zu verwechseln. Diese ist ein gesetzlich verpflichtendes Werk, das Unternehmen zur Einhaltung und Offenlegung von Nachhaltigkeitsstandards verpflichtet. Die Modelle beziehen sich auf eine strategische Ebene.

⁺ Die Donut-Ökonomie ist ein wirtschaftswissenschaftliches Konzept, das Wohlstand für alle innerhalb der planetaren Grenzen anstrebt, statt nur auf Wirtschaftswachstum zu fokussieren. Es visualisiert einen sicheren und gerechten Handlungsraum für die Menschheit in Form eines Donuts: Die äußere Grenze bildet eine ökologische Leitplanke, die innere das soziale Fundament.

Kompetenzaufbau ist ein weiterer Erfolgsfaktor. Mit Blick auf Kommunen und Städte sollten hier Ansätze des Wissensmanagements wie etwa bundesübergreifende Communities of Practice mitgedacht werden.

Gesellschaftlich fehlt derzeit noch ein breit akzeptiertes, positives Narrativ der Transformation. Das liegt unter anderem daran, dass Menschen häufig nur eine ungefähre Vorstellung von den Auswirkungen ihres Konsums haben (Wintermann 2024). Gerade Kommunen könnten einerseits die eigene Transformation und andererseits als Moderatoren kommunale Entwicklungsprozesse vorantreiben (z. B. digitale Verkehrsregelung, Gewerbeansiedlung für digitale Vorreiter, Förderung nachhaltiger Energien). Die Neugestaltung der kommunalen Mobilität, der Städte als Lebens- und nicht nur Verkehrsräume und der Gewerbeansiedlung von nachhaltigen Unternehmen wären geeignete Leuchtturmprojekte.

Nachhaltige Geschäftsmodelle

Ein Digitaler Zwilling muss in ein nachhaltiges Geschäftsmodell eingebettet sein, um bestmöglich für eine ökologisch sinnvolle digitale Transformation wirken zu können. Gemeint sind solche Modelle, die weder Umwelt noch Menschen schaden. Im industriellen Kontext lässt sich z. B. die **Ökoeffizienz und Ökoeffektivität**  von Produkten erhöhen (Behrendt/Göll/Korte 2018, S. 27). Diese Paradigmen unter der Prämisse technischen Fortschritts reichen jedoch nicht aus. Es braucht außerdem die Suffizienz und den entsprechenden kulturellen Wandel, um mögliche Rebound-Effekte und materielle Überfüllung des Planeten zu verhindern. Die Wettbewerbsfähigkeit zukünftiger Geschäftsmodelle kann zum Beispiel davon abhängen, ob Produkte über Sachgüter hinaus zu **Produkt-Service-Systemen (PSS)**  transformiert werden können. Darüber hinaus sollten Unternehmen, die nachhaltige Standards umsetzen und Open-Source-Daten zum Wohle der Allgemeinheit zur Verfügung stellen, politisch unterstützt werden. Produktionsrandbedingungen sollten im internationalen Wettbewerb für alle gelten, die Produkte in der EU verkaufen.

In kommunalen und städtischen Digitalen Zwillingen können ebenso Aspekte nachhaltiger Geschäftsmodelle Eingang finden: Die Neu- oder Umplanung von Geschäftsvierteln, die Prüfung von Rohstoffvorhaben, die vorausschauende Planung des Umgangs mit Müll oder die Überwachung und Wartung von Wasserleitungen und den dort verbauten Komponenten sind nur einige Beispiele für direkte Anknüpfungspunkte. Unternehmen können z. B. durch niedrigere Kosten in Projekten öffentlicher Auftraggeber oder schnellere Genehmigungsverfahren direkt davon profitieren.

 **Ökoeffizienz und Ökoeffektivität sind notwendige, aber nicht hinreichende Eigenschaften für Nachhaltigkeit: Ökoeffizienz ist das Verhältnis von wirtschaftlichem Nutzen zu ökologischen Auswirkungen, mit dem Ziel, den Ressourcenverbrauch zu minimieren. Ökoeffektivität bezieht sich auf die gesamte ökologische Wirkung eines Systems oder Produkts. Hier sollen Abfälle vermieden und Ressourcen in geschlossenen Kreisläufen gehalten werden. Suffizienz wird definiert als eine Strategie zur Reduktion von Konsum- und Produktionsniveaus durch die Veränderung sozialer Praktiken.**

 **Ein Produkt-Service-System (PSS) ist ein integriertes Geschäftsmodell, das Produkte und Dienstleistungen kombiniert, um den Nutzen zu maximieren. Mit PSS bieten Unternehmen Lösungen an, die auf Nutzung und Funktionalität basieren, wie Leasing oder Carsharing. Dieses Modell fördert Nachhaltigkeit, indem es die Produktlebensdauer verlängert und Ressourcen effizienter nutzt.**

Weil Digitale Zwillinge Wertschöpfungsnetzwerke organisationsübergreifend transparent machen können, sind sie ein wichtiges Werkzeug, um Geschäftsmodelle in ganz neuer Qualität nachhaltig zu gestalten. Mit ihren Simulationen und Prognosen können Nachhaltigkeitspotenziale über den gesamten Produktlebenszyklus erschlossen werden. ProduktHersteller können zusätzliche Services wie vorausschauende Instandhaltung anbieten und gleichzeitig Ressourcen schonen. Dabei ist ein Maximum der drei genannten Dimensionen Erlös durch erweiterten Leistungsumfang, Ökoeffizienz und Ökoeffektivität anzustreben.

Case: Virtuelle Demontage von Automobilbaugruppen

Aktuell werden nur etwa 20 Prozent der in Europa produzierten Altfahrzeuge auch in Europa wiederverwertet. Die restlichen werden als Gebrauchtwagen exportiert, einschließlich der Sekundärmaterialien (EU-Recycling 2018, S. 43). Das Verschrotten der Fahrzeuge erfolgt überwiegend in Handarbeit unter desaströsen humanitären und ökologischen Bedingungen. Der Konsortialführer des vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg geförderten Projektes EcoPass3D erklärte im Rahmen eines Workshops zum Projekt, dass für eine effiziente, umweltverträgliche und wirtschaftliche Kreislaufführung von Altfahrzeugen in Europa ein hoher Automatisierungsgrad bei der Demontage und Vorsortierung erreicht werden müsse (Dr. Robert Dannecker, persönliche Kommunikation, 13.03.2024).

Die TECOSIM GmbH und die ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH entwickeln mit Unterstützung durch das Fraunhofer IAQ im Rahmen von EcoPass3D ein Datenmodell. Es besteht aus Automobilbaugruppen und Demontagerobotern, um die automatisierte Demontage zu simulieren. Ziel ist es, schon früh im Produktlebenszyklus sicherzustellen, dass Bauteile am Ende ihrer Nutzung ohne Schäden zerlegt werden können. Während der Simulation wird ein Demontageplan erstellt, den Roboter später direkt lesen und nutzen können, um die Demontage automatisch durchzuführen.

Dieser Digitale Zwilling ermöglicht eine Kreislaufführung und damit Wiedergewinnung von Automobilkomponenten. Durch die Rückführung von Simulationsergebnissen in den Datenkreislauf können Beteiligte im Produktentwicklungsprozess künftig Produkte entwickeln, die besser recycelbar sind. Die automatisierte Demontage mit maschinenlesbaren Demontageplänen fördert ein Umdenken in der Industrie und der Gesellschaft. Der Ansatz unterstützt den Übergang zu einer kreislauforientierten Wirtschaftsweise.

☒ Auf EU- und Bundesebene setzt sich die Politik mit dem Digitalen Produktpass (DPP) für den Klimaschutz ein. Der DPP, selbst eine Art Digitaler Zwilling, besteht aus einem Datensatz zu Komponenten, Materialien, Substanzen, Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder Entsorgung eines Produkts über den Produktlebenszyklus hinweg (BMUV o. J.).

Die nachhaltige Umsetzung Digitaler Zwillinge

Trotz der Potenziale und Chancen sollte der Einsatz Digitaler Zwillinge stets abgewogen werden. Zu beachten sind Energie- und Ressourcenbedarf sowie nötige arbeitsorganisatorische und kulturelle Veränderungen in Organisationen. Mit Blick auf die Hardware werden sowohl Sensoren benötigt, um Daten zu sammeln, als auch leistungsfähige Rechner, um sie verarbeiten zu können. Unternehmen, Kommunen und die Politik sollten sich daher im Vorfeld bewusst machen, für welche Anwendungen ein Digitaler Zwilling sinnvoll genutzt werden kann (Quaing et al. 2023). Folgende Aspekte gilt es zu beachten:

Erstellung und Betrieb: Virtuelle Abbilder sind je nach Komplexitätsgrad unterschiedlich zeit- und ressourcenintensiv. Es sollte daher im Vorfeld genau geprüft werden, welcher Detailgrad benötigt wird. Außerdem sollten Projekte langfristig geplant werden, sodass nach einer erfolgreichen Pilotphase auch die produktive Nutzung gesichert ist.

IT-Infrastruktur: Digitale Darstellungen, Datenverarbeitung, Simulationen – all das benötigt IT-Infrastruktur in Form von Servern und Rechenzentren. Ein Digitaler Zwilling kann nur nachhaltig sein, wenn seine Einsparungen diese laufenden Kosten übersteigen und dabei auch Externalitäten berücksichtigt werden. (Generell sollten Rechenzentren nachhaltig sein, sowohl in Bezug auf die Langlebigkeit und Energieeffizienz der Hardware als auch bei Fragen der Abwärme etc.)

Sensorik: Sensoren sollten gemäß dem Grundsatz „So wenig wie möglich, so viel wie nötig“ eingesetzt werden, weil Bau, Betrieb und Wartung Ressourcen kosten. Effizienzpotenzial bietet die sogenannte On-Edge-Datenverarbeitung, bei der ein Videostream bereits auf dem Endgerät ausgewertet und nur das Ergebnis an den Digitalen Zwilling übertragen wird.

Daten: Qualitativ hochwertige Daten sind essenziell für die Leistungsfähigkeit Digitaler Zwillinge. Doch meist liegen sie unstrukturiert und in Silos vor. Inkonsistenzen und fehlende Standards erschweren die Nutzung zusätzlich. Diese Probleme müssen frühzeitig adressiert werden. Gemäß der Datensparsamkeit sollten nur die Daten erhoben werden, die auch genutzt werden. Jeder Datensatz muss gespeichert oder weiterverarbeitet werden und verbraucht entsprechend Energie und Speicherplatz (Gantz/Reinsel 2012, Tao et al. 2018).

IT- und Datensicherheit

Ein zentraler Aspekt der Datensicherheit bei Digitalen Zwillingen ist der Schutz vor Cyberangriffen und Ransomware, mit der Kriminelle z. B. Daten verschlüsseln und Lösegeld verlangen. Solche Angriffe gefährden die Verfügbarkeit und Integrität der Daten, was zu Produktionsausfällen oder der Störung kritischer Infrastrukturen führen kann und das Vertrauen in die Technologie untergräbt. Auch die Manipulation von Daten ist ein Risiko. Arbeiten Digitale Zwillinge mit manipulierten Daten, kann das zu falschen Entscheidungen führen und in der Produktion, im Gesundheitswesen oder in anderen Bereichen erheblichen Schaden anrichten. Transparente Datenwertschöpfung, ethische Leitlinien und klare Verantwortlichkeiten sind unerlässlich, um sicherzustellen, dass Entscheidungen auf korrekten Daten beruhen. Die Qualität der Daten kann auch mit einer On-Premise-Serverstruktur (Server vor Ort) sichergestellt werden. Die Long-Range-Wide-Area-Network(LoRaWAN)-Technologie eignet sich, wenn Unternehmensstandorte nah beieinander sind. So kann auf Technologien wie Blockchain verzichtet werden, die auch Daten sicher verschlüsseln, aber viel Energie verbrauchen können. Wetter-, Gebäude- oder andere nicht personenbezogene Daten können übrigens DSGVO-konform in einen Digitalen Zwilling eingespeist werden. Letztendlich ist eine ganzheitliche Datenstrategie nötig, damit das Zusammenspiel der Technologien keinen Schaden anrichtet.

Digitale Zwillinge und Künstliche Intelligenz

In Kombination mit Künstlicher Intelligenz (KI) lassen sich Digitale Zwillinge für zusätzliche Effizienzpotenziale und Innovationen im Sinne der Nachhaltigkeit nutzen. Einige Beispiele:

- Auf offenen Plattformen wird im Recyclingprozess eine höhere Rohstoffqualität und Materialreinheit erzielt. Das hat positive Auswirkungen auf die Circular Economy (u. a. Amrhein-Bläser 2020).
- Bei der Erkundung von Rohstoffvorkommen können KI-gestützte Analysen von Geodaten Suchkosten reduzieren und für die Extraktion weniger zugängliche Regionen Europas zugänglicher machen. Dies senkt Transportkosten und transportbezogene Emissionen (u. a. Leitl et al. 2025 [im Druck]).
- Supra-Plattformen könnten zu mehr Wissen über die in Produkten gebundenen Materialien führen und damit zur Erkenntnis, dass weniger Rohstoffe extrahiert werden müssen.
- Es lassen sich im Produktdesign unnötige Komponenten und Materialien vermeiden, was die Zahl der Iterationsschleifen am physischen Produkt reduziert.

Case: DestinE – der Digitale Zwilling unseres Planeten Erde

Ziel der Initiative Destination Earth (DestinE) ist es, einen einheitlichen Digitalen Zwilling der Erde zu schaffen, um in Echtzeit Klimaparameter darzustellen, Naturphänomene zu überwachen und vorherzusagen sowie Simulationen zu nutzen. Der Zwilling soll auch den Kontext menschlicher Aktivitäten aufzeigen können und die Komplexität der Beziehungen von Umwelt, Gesellschaft, Politik und Wirtschaft präziser widerspiegeln, um zukunftsgerichtete Entscheidungen zu ermöglichen. DestinE ist Teil des Green Deals und der Digitalstrategie der Europäischen Kommission.

DestinE besteht aus drei Säulen: Das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage koordiniert die noch unterschiedlichen digitalen Zwillinge, die bis 2030 vereint werden sollen. Die zentrale Serviceplattform liegt bei der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Den Data Lake betreibt die Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten.

Um evidenzbasierte Entscheidungen und globale wissenschaftliche Zusammenarbeit mit den Daten zu fördern, wird schon jetzt bei Wissenschaftler*innen, Klimaadvokat*innen und Policy-Maker*innen für das Potenzial von DestinE geworben. Während der Aufbauphase bis 2030 sollen weitere Digitale Zwillinge hinzukommen, etwa zu den Ozeanen oder zur Biodiversität.

Handlungsempfehlungen

Minimalismus beim Einsatz von Ressourcen

Kommunen und Unternehmen sollten Sensoren, Kameratechnologie, IT-Technik und Daten strikt nach dem Prinzip „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“ einsetzen, um Energie zu sparen und Ressourcen zu schonen. Um die Gesamtbilanz dieser Maxime zu berücksichtigen, gilt diese nicht nur in der Aufbauphase des Digitalen Zwillings, sondern auch während seiner Nutzung (beispielsweise wenn Rechenzentren gekühlt werden müssen).

Nutzung bestehender Datenquellen, Standardisierung sowie Open Data und Open Source

Geodaten, standardisierte Datenformate und andere bestehende Datenquellen wie Open Data oder behördliche Daten sollten genutzt werden, um mit einfachen Digitalen Zwillingen rasch Mehrwerte zu schaffen und

zuliefernde Systeme effizient zu integrieren. Eigene Daten zur Verfügung zu stellen (z. B. Flächennutzungsplanungen in Kommunen), ermöglicht fundierte Beteiligung von Bürger*innen und neue Planungsmöglichkeiten für die lokale Wirtschaft. Im Hinblick auf die Wirtschaft kann auch eine teilweise Verpflichtung zu Open Source für den nachhaltigeren Umgang mit Produkten sorgen (Reparierbarkeit, zivilgesellschaftliche Nutzung etc.).

Klare, messbare Nachhaltigkeitsziele setzen

Kommunen und Unternehmen sollten sich für den Betrieb Digitaler Zwillinge Ziele setzen, die messbar, realistisch und terminiert sind, um einen nachhaltigen Nutzen zu gewährleisten und eine umfassende Evaluierung zu ermöglichen. Dabei kann zwischen direkten und indirekten Zielen unterschieden werden: Optimiert ein Digitaler Zwilling in einer Stadt z. B. den Verkehr, können direkte Ziele weniger Staus und eine kürzere Fahrzeit sein. Indirekt wird dadurch auch der Ausstoß von Emissionen gesenkt. Ein regelmäßiger Vergleich der Ausgangsdaten und Resultate unterstützt die Nachhaltigkeitsziele.

Förderung von interdisziplinärem Austausch

Der anwendungsorientierte Aufbau Digitaler Zwillinge erfordert eine Vielzahl von Kompetenzen, die sich im behördenübergreifenden Austausch oder in der engen Zusammenarbeit zwischen öffentlichem und privatem Sektor weiterentwickeln können, aber auch in der Ausbildung bereits berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus erhöhen Leuchtturmprojekte und spannende Weiterbildungsmöglichkeiten die Attraktivität von Arbeitsplätzen, gerade im öffentlichen Sektor.

Beteiligung von Bürger*innen und Akzeptanzförderung

Digitale Zwillinge ermöglichen es Bürger*innen, niedrigschwellig an der kommunalen Entwicklung und der Planung von Vorhaben, z.B. in den Bereichen Energie, Kultur oder bei der Ansiedlung neuer Unternehmen, teilzuhaben. Außerdem kann die Technologie als Informationshub dienen und z. B. Größe und Angebote von Schulen miteinander vergleichen und Zuordnungsprozesse nachvollziehbar machen.

Wichtig sind nicht nur politische Rahmenwerke, die den Wandel begleiten. Es ist auch der politische Wille notwendig, um eine Zukunftsvision aktiv zu gestalten, die der Klimakrise begegnet.

Vision: Digitale Zwillinge für eine nachhaltige und resiliente Gesellschaft

Das Ziel Digitaler Zwillinge sollte immer darin bestehen, zu einer positiven Bilanz der sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit unseres Alltags, der Produktion und der Art des Arbeitens beizutragen – in allen Phasen des Aufbaus und der Nutzung der Technologie. Obwohl es derzeit noch schwierig ist, diesen Effekt zu quantifizieren, sollte es stets das Ziel sein, Methoden zu entwickeln, die den Einfluss von Digitalen Zwillingen auf Menschen und Umwelt im Hinblick auf Nachhaltigkeit abbilden können. So können Digitale Zwillinge beispielsweise die Circular Economy unterstützen und einen wichtigen Beitrag zu großen Herausforderungen wie dem Klimawandel und der Krise der Biodiversität leisten.

Dieses Potenzial wird realisierbar, wenn Digitale Zwillinge in der Lage sind, sich in ihre eigenen Zielwertberechnungen einzubeziehen. Ein Digitaler Zwilling, der seinen CO₂-Handabdruck  sowie seine Auswirkung auf die natürlichen Lebensgrundlagen kennt, könnte autonom seine Sensorik überwachen, ineffiziente Komponenten erkennen und Wartungen planen. Am Ende kann er eigenständig den Netto-Nachhaltigkeitswert berechnen. Ein solches selbstoptimierendes System steigert die Effizienz und erhöht den ökologischen Beitrag.

Der nachhaltige gesellschaftliche und soziale Nutzen Digitaler Zwillinge muss ebenfalls im Fokus bleiben. Gerade im Kontext von Städten und Kommunen ist soziale Nachhaltigkeit eine wichtige Dimension: Digitale Zwillinge ermöglichen datenbasierte gesellschaftspolitische Entscheidungen, sei es in der Planung von neuem Wohnraum, bei der Anpassung von Schulgrößen und -standorten oder für eine inklusivere Stadtplanung, die den Bedürfnissen der ältesten und jüngsten Bewohner*innen gleichermaßen gerecht wird. Digitale Zwillinge ermöglichen die niedrighwellige Partizipation aller Akteur*innen an den Veränderungen unserer Lebenswelten. Das fördert die Akzeptanz und Zufriedenheit und kann zu einer gerechteren Zukunft beitragen.

Hinweis: Die Kernbotschaften wurden auf Grundlage des Denimpulses mit Unterstützung von ChatGPT formuliert. Bei der Erstellung der Szenarien wurde ebenfalls auf ChatGPT zurückgegriffen.

 Der CO₂-Handabdruck ist ein Konzept zur Messung und Darstellung der positiven Klimawirkungen. Im Gegensatz zum CO₂-Fußabdruck, der die verursachten Treibhausgasemissionen erfasst, bilanziert der Handabdruck die bereits erreichten Einsparungen und Verbesserungen in Bezug auf den Klimaschutz.

Literaturverzeichnis

- Accenture/Dassault Systèmes (2021):** Designing Disruption. The critical role of virtual twins in accelerating sustainability. Online verfügbar unter: [accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-147/accenture-virtual-twin-and-sustainability.pdf](https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-147/accenture-virtual-twin-and-sustainability.pdf) (Abfrage: 13.11.2024).
- Amrhein-Bläser, Christina (2020):** Demonatage 4.0 – künstliche Intelligenz macht Recycling effizienter. Online verfügbar unter: [wissenhochn.de/de/themen/auswahl-und-uebersicht/einzelansicht/demontage-40-kuenstliche-intelligenz-macht-recycling-effizienter](https://www.wissenhochn.de/de/themen/auswahl-und-uebersicht/einzelansicht/demontage-40-kuenstliche-intelligenz-macht-recycling-effizienter) (Abfrage: 13.11.2024).
- Arup (2019):** Digital Twin. Towards a meaningful framework. Online verfügbar unter: [arup.com/globalassets/downloads/insights/digital-twin-towards-a-meaningful-framework.pdf](https://www.arup.com/globalassets/downloads/insights/digital-twin-towards-a-meaningful-framework.pdf) (Abfrage: 13.11.2024).
- Behrendt, Siegfried/Göll, Edgar/Korte, Friederike (2018):** Effizienz, Konsistenz, Suffizienz. Strategieanalytische Betrachtung für eine Green Economy. IZT-Text 2018, 1. Online verfügbar unter: [izt.de/media/2022/10/IZT_Text_1-2018_EKS.pdf](https://www.izt.de/media/2022/10/IZT_Text_1-2018_EKS.pdf) (Abfrage: 13.11.2024).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (o. J.):** Was ist ein digitaler Produktpass? Online verfügbar unter: [bmu.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass](https://www.bmu.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass) (Abfrage: 13.11.2024).
- EU-Recycling (2018):** Wie können Autos in Zukunft recycelt werden? In: EU-Recycling + Umwelttechnik – Das Fachmagazin für den europäischen Recyclingmarkt 2018, 5, S. 42–44. Online verfügbar unter: [eu-recycling.com/pdf/EU-Recycling_05-2018.pdf](https://www.eu-recycling.com/pdf/EU-Recycling_05-2018.pdf) (Abfrage: 13.11.2024).
- Gantz, John/Reinsel, David (2012):** The Digital Universe in 2020: Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East. In: IDC iView: IDC Analyze Future 2007, S. 1–16. Online verfügbar unter: [cs.princeton.edu/courses/archive/spring13/cos598C/idc-the-digital-universe-in-2020.pdf](https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spring13/cos598C/idc-the-digital-universe-in-2020.pdf) (Abfrage: 13.11.2024).

- Grieves, Michael/Vickers, John (2017):** Digital Twin. Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, Franz-Josef/Flumerfelt, Shannon/Alves, Anabela (Hrsg.): Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. New Findings and Approaches. Schweiz: Springer International Publishing. S. 85–113.
- Jackmuth, Andreas/König, Wilfried/Marzahn, Gero/Mertzsch, Olaf/Pinnel, René (2022):** Die neue Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen. In: Bergmeister, Konrad/Fingerloos, Frank/Wörner, Johann-Dietrich (Hrsg.): Beton-Kalender 2022. Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung. Berlin: Ernst & Sohn, S. 349–373.
- Kroker, Michael (2019):** Industrie 4.0: Digitaler Zwilling senkt Aufwand für Wartung um 30 Prozent – Kosten um die Hälfte. Online verfügbar unter: blog.wiwo.de/look-at-it/2019/11/27/industrie-4-0-digitaler-zwilling-senkt-aufwand-fuer-wartung-um-30-prozent-kosten-um-die-haelfte/ (Abfrage: 13.11.2024).
- Leitl, Michael/Quaing, Jan/Helms, Birgitt/Langhammer, Kay/Graf, Johanna/Rohrschneider, David/Szabó-Müller, Paul (im Druck):** Künstliche Intelligenz für die Circular Economy – Ein Werkzeug für nachhaltige Transformation? In: Prospektiven. Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2025. Bottrop: Prosperkolleg e.V.
- Quaing, Jan/Fink, Julia/Bilfinger, Beatriz/Vorländer, Fabian (2023):** Doppelte Transformation gestalten. Ein Praxisleitfaden zu Nachhaltigkeit und Digitalisierung. DBU Umweltkommunikation, 17. München: Oekom (auch online verfügbar unter: oekom.de/buch/doppelte-transformation-gestalten-9783962381295 [Abfrage: 13.11.2024]).
- Raworth, Kate (2018):** Die Donut-Ökonomie. Endlich ein Wirtschaftsmodell, das den Planeten nicht zerstört. München: Hanser.
- Rosen, Roland/von Wichert, Georg/Lo, George/Bettenhausen, Kurt D. (2015):** About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine 48, 3, S. 567-572. Online verfügbar unter: sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003808/pdf?md5=23e4c19efe2877fd3d5f5c9e16232341&pid=1-s2.0-S2405896315003808-main.pdf (Abfrage: 13.11.2024).

Tao, Fei/Cheng, Jiangfeng/Qi, Qinglin/Zhang, Meng/Zhang, He/Sui, Fangyuan (2018): Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94, S.3563–3576.

Wintermann, Ole (2024): Digitaler und nachhaltiger Wandel. Überforderung der Konsumierenden? Online verfügbar unter: zukunfndernachhaltigkeit.de/2024/02/15/digitaler-und-nachhaltiger-wandel/ (Abfrage: 13.11.2024).

Wintermann, Ole/Wintermann, Birgit/Jöster-Morisse, Clara/Daheim, Cornelia/Wirz, Johannes (2022): Doppelte Transformation zur Nachhaltigkeit. Eine Annäherung an Zukunftsperspektiven. Eine Publikation des Co:Lab und der Bertelsmann Stiftung. Online verfügbar unter: bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/PicturePark/2022-09/Doppelte_Transformation_zur_Nachhaltigkeit.pdf (Abfrage: 13.11.2024).

Impressum

Initiative D21 e.V.
Reinhardtstraße 38
10117 Berlin
Telefon: 030 7675853-50
kontakt@InitiativeD21.de
www.InitiativeD21.de

November 2024

Download

initiated21.de/publikationen/denkimpulse-digitale-gesellschaft