

3

Digitale Zwillinge im regionalen Strukturwandel – Neue Wege der politischen Steuerung von Wirtschafts- und Innovationsaktivitäten

Autorinnen und Autoren

Dr. Ann-Kathrin Dieterle, Dr. Anna Wachsmuth-Pohle, Ralph Frank, Läticia Ertle

Herausgeberinnen und Herausgeber der Impulsreihe

Dr. Friedrich Dornbusch, Dr. Benjamin Klement, Dr. Ann-Kathrin Dieterle
Fraunhofer ISI, Standort Leipzig. Q1 2026

*Impulse für den
regionalen
Strukturwandel*

GENESIS

Gestaltung neuer Entwicklungspfade im Strukturwandel in Sachsen

**ge
ne
sis**

Impressum

Digitale Zwillinge im regionalen Strukturwandel – Neue Wege der politischen Steuerung von Wirtschafts- und Innovationsaktivitäten

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Standort Leipzig

Martin-Luther-Ring 13, 04109 Leipzig

Dr. Friedrich Dornbusch, friedrich.dornbusch@isi.fraunhofer.de (Projektleitung)

Dr. Benjamin Klement, benjamin.klement@isi.fraunhofer.de (Stellvertretende Projektleitung)

Dr. Ann-Kathrin Dieterle, ann-kathrin.dieterle@isi.fraunhofer.de (Teilprojektleitung)

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Dr. Ann-Kathrin Dieterle, ann-kathrin.dieterle@isi.fraunhofer.de

Dr. Anna Wachsmuth-Pohle, anna.wachsmuth-pohle@isi.fraunhofer.de

Ralph Frank, ralph.frank@uni-jena.de

Läticia Ertle, laeticia.ertle@isi.fraunhofer.de

Förderrahmen

Bundesprogramm Stärkung der Transformationsdynamik und Aufbruch in den Revieren und an den Kohlekraftwerkstandorten (STARK) des BMWF, Förderkennzeichen „46SKD127X“

Zitierempfehlung

Dieterle, A.-K., Wachsmuth-Pohle, A., Frank, R., & Ertle, L. (2026). Digitale Zwillinge im regionalen Strukturwandel – Neue Wege der politischen Steuerung von Wirtschafts- und Innovationsaktivitäten (Impulse für den regionalen Strukturwandel, Impulspapierreihe QI/2026). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Standort Leipzig.

Veröffentlicht

QI 2026

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

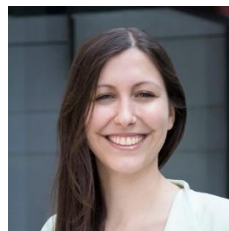
Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Projektleitung	2
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI	2
Verantwortlich für den Inhalt des Textes	2
Förderrahmen	2
Zitierempfehlung	2
Veröffentlicht	2
Hinweise	2
Über die Autorinnen und Autoren dieses Impulses	4
Vorwort	5
Executive Summary	6
1 Einleitung	7
2 Einordnung digitaler Zwillinge: Bedeutung für die Zukunft der Regionalentwicklung	9
2.1 Definition des Begriffs „Digitaler Zwilling“ – Begriffe und Unterschiede	9
2.2 Zentrale Herausforderungen in der Regionalentwicklung und der Beitrag digitaler Zwillinge	11
2.3 Digitale Zwillinge als strategisches Werkzeug moderner Wirtschafts- und Innovationspolitik	13
2.4 Technische und funktionale Anforderungen an digitale Zwillinge im regionalen Strukturwandel	14
3 Datengrundlagen und methodisches Vorgehen der Analyse	16
4 Die Landschaft digitaler Zwillinge: Erkenntnisse aus 60 bestehenden Anwendungen für Regionen und Kommunen	17
4.1 Praxisbeispiele zur Anwendung digitaler Zwillinge	17
4.2 Befunde zur Funktionslogik digitaler Zwillinge	21
4.3 Befunde zu Daten- und Modellierungsmodellen digitaler Zwillinge	22
5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für den Strukturwandel	24
6 Literatur	27

Über die Autorinnen und Autoren dieses Impulses



Dr. Ann-Kathrin Dieterle
Teilprojektleitung
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
„Innovationspolitik und Transferdesign“
Fraunhofer ISI



Dr. Anna Wachsmuth-Pohle
Projektmitarbeiterin
Gruppenleitung
„Innovationspolitik und Transferdesign“
Fraunhofer ISI

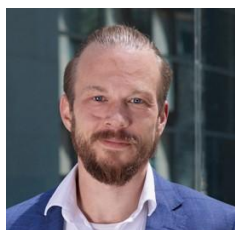


Ralph Frank
Ehemaliger Projektmitarbeiter
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
„Institut für Geographie“
Universität Jena



Läticia Ertle
Projektmitarbeiterin
Wissenschaftliche Hilfskraft
„Innovationspolitik und Transferdesign“
Fraunhofer ISI

Über die Herausgeberinnen und Herausgeber dieser Impulsreihe



Dr. Friedrich Dornbusch
Projektleitung
Abteilungsleitung
„Regionale Transformation
und Innovationspolitik“
Fraunhofer ISI



Dr. Benjamin Klement
Stv. Projektleitung
Gruppenleitung
„Innovative Regionen“
Fraunhofer ISI



Dr. Ann-Kathrin Dieterle
Teilprojektleitung
Wissenschaftliche
Mitarbeiterin
„Innovationspolitik und
Transferdesign“
Fraunhofer ISI

Vorwort

Durch den regionalen Strukturwandel stehen viele Kommunen, Landkreise und Bundesländer vor tiefgreifenden Veränderungsprozessen, die weit über einzelne Projekte hinausreichen. Sie betreffen die Schaffung und Erhaltung künftiger wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit ganzer Regionen, des sozialen Zusammenhalts sowie der Fähigkeit, neue Entwicklungspfade zu erschließen. Für diese anspruchsvollen Aufgaben braucht es Orientierung, Transparenz und verlässliche Entscheidungsgrundlagen.

Mit der Reihe „Impulse für den regionalen Strukturwandel“ – entstanden im Projekt „Gestaltung neuer Entwicklungspfade im Strukturwandel in Sachsen“ (GENESIS) – möchten wir genau hier ansetzen. Als Forschungsprojekt begleiten wir seit 2023 die sächsischen Strukturwandelregionen und analysieren gemeinsam mit beteiligten Organisationen, Entscheidungsträger:innen und Netzwerken, wie Transformationsprozesse gestaltet und beschleunigt werden können. Dabei ist die Entwicklung eines digitalen Zwillings der beiden sächsischen Reviere ein zentraler Projektbaustein. Unsere Impulspapiere sollen Ihnen, den politischen Entscheidungsträger:innen und regionalen Gestalter:innen, regelmäßig Denkansätze und praktische Orientierung bieten – fundiert, verständlich und anwendungsnah.

Das **vorliegende Impulspapier** widmet sich einem Thema, das in den kommenden Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen wird: dem **Einsatz digitaler Zwillinge in der Regionalentwicklung**. Diese Modelle eröffnen neue Möglichkeiten, komplexe Entwicklungen sichtbar zu machen, Förderstrategien datenbasiert zu steuern und Entscheidungen transparenter zu gestalten. Gerade in Transformationsregionen können sie helfen, Chancen frühzeitig zu erkennen, Risiken besser abzuschätzen und die Akzeptanz politischer Maßnahmen zu erhöhen.

Wir freuen uns, Ihnen mit diesem Papier einen aktuellen Überblick über die Potenziale, Herausforderungen und bestehenden Anwendungsbeispiele digitaler Zwillinge im Strukturwandelkontext zu geben. Es soll einladen, neue Perspektiven einzunehmen, bestehende Steuerungsansätze weiterzuentwickeln und die Diskussion über datenbasierte Politikgestaltung im regionalen Kontext voranzubringen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre und freue mich auf den weiteren Austausch im Rahmen von GENESIS.

Herzlich
Dr. Friedrich Dornbusch
im Namen des GENESIS-Teams

Executive Summary

Digitale Zwillinge werden in Deutschland bislang überwiegend in der Stadtentwicklung, Mobilität, Energie- und Umweltplanung eingesetzt. Ihr Potenzial für die politische Steuerung regionaler Transformationsprozesse – insbesondere im Kontext des Strukturwandels – ist jedoch weitgehend ungenutzt. Die Analyse dieses Impulspapiers zeigt, dass digitale Zwillinge wichtige Grundlagen schaffen können, um komplexe regionale Entwicklungen transparenter, nachvollziehbarer und datenbasierter zu gestalten. Gleichzeitig wird deutlich, dass bestehende Anwendungen derzeit vor allem räumlich-technische Fragestellungen abdecken und zentrale sozioökonomische Dimensionen regionaler Entwicklung kaum berücksichtigen.

Das Impulspapier richtet sich an politische Entscheidungsträger:innen, Verwaltungen, Wirtschaftsförderungen sowie regionale und interessierte Akteure und beantwortet die Leitfrage: **Wie können digitale Zwillinge politische Entscheidungsträger:innen bei der Steuerung regionaler Strukturwandelprozesse unterstützen?**

Dazu werden zunächst zentrale Begriffe, die unter dem Sammelbegriff digitale Abbilder stehen (digitaler Zwilling, statistischer Zwilling, Geobasiszwilling, lokaler bzw. urbaner digitaler Zwilling), präzisiert und abgegrenzt, um eine gemeinsame Verständigungsbasis für Bund, Länder, Kommunen und Wirtschaft zu schaffen. Anschließend werden die spezifischen Herausforderungen der Regionalentwicklung im Strukturwandel – darunter Transparenzbedarfe, komplexe Interessenlagen, Datenfragmentierung und fehlende Szenarien – den Potenzialen digitaler Zwillinge gegenübergestellt.

Auf Basis einer systematischen Untersuchung von 60 bestehenden digitalen Zwillingen werden folgende dominante Funktionslogiken identifiziert: Monitoring und Visualisierung, Analytik und Bewertung sowie – deutlich seltener – Simulation und Szenarien. Die Analyse zeigt, dass viele digitale Zwillinge räumliche und technische Entwicklungen sehr gut abbilden, aber kaum Daten zu wirtschaftlichen, sozialen oder innovationsbezogenen Prozessen integrieren. Somit unterstützen sie heute vor allem operative, weniger jedoch strategische Steuerungsaufgaben im Strukturwandel.

Für die politische Praxis ergeben sich zentrale Implikationen: digitale Zwillinge können Transparenz stärken, komplexe Entwicklungen sichtbar machen und Entscheidungsprozesse nachvollziehbarer gestalten. Sie können zur Prüfung von Fördermaßnahmen, zur Priorisierung von Investitionen oder zur Bewertung von Klima-, Mobilitäts- und Infrastrukturmaßnahmen beitragen. Damit digitale Zwillinge jedoch auch strategische Transformationsprozesse abbilden können, müssen Datenintegration, Interoperabilität und Governance-Strukturen weiterentwickelt und sozioökonomische Daten stärker eingebunden werden.

Wissenschaftlich leistet das Impulspapier einen Beitrag zur Präzisierung des Begriffs „Digitaler Zwilling“ in der Regionalentwicklung. Es zeigt, dass statistische Zwillinge – als modellgestützte, nicht-echtzeitbasierte Abbilder regionaler Wirtschafts- und Innovationssysteme – wichtige Ergänzungen darstellen. Transformationsprozesse lassen sich erst durch hybride Zwillinge umfassend und evidenzbasiert unterstützen – durch die Kombination räumlicher digitaler Zwillinge mit statistischen, systemischen Modellen.

Damit schafft das Impulspapier einen Orientierungsrahmen für Regionen, die digitale Zwillinge gezielt für strategische Steuerungsprozesse nutzen wollen – auch schrittweise, ohne große Anfangsinvestitionen. Für Wissenschaft und Praxis eröffnet es neue Perspektiven, wie komplexe sozioökonomische Systeme datenbasiert analysiert und regionale Transformationsprozesse wirksam begleitet werden können.

1 Einleitung

Der Strukturwandel in Deutschland, insbesondere in Regionen mit traditionellen Industriezweigen, hat Kommunen, Landkreise und Länder zunehmend vor die Aufgabe gestellt, ihre Wirtschaftsstrukturen zu diversifizieren und neue, resiliente Entwicklungspfade zu erschließen. Während einige Regionen über etablierte Innovationsmilieus verfügen, stehen strukturschwächere Räume vor der Herausforderung, tief verankerte Abhängigkeiten von wenigen Branchen zu überwinden und Investitionen in zukunftsfähige Tätigkeitsfelder anzustoßen. Dabei erweisen sich wenig diversifizierte und periphere Strukturen oft als hemmende Faktoren, die durch gezielte Interventionen überwunden werden können (Grillitsch et al. 2018). Die Unterstützung der Entwicklung resilienter und diversifizierter Wirtschaftsstrukturen ist daher zu einer zentralen Aufgabe für die Politik geworden.

Gerade in den ostdeutschen Kohleregionen eröffnet der Strukturwandel Möglichkeiten für neue Entwicklungspotenziale. Mit dem Kohleausstiegsgesetz von 2020 wurde der schrittweise Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 beschlossen, wobei das Mitteldeutsche Revier den Ausstieg bis 2035 bzw. das Lausitzer Revier bis 2038 – möglicherweise auch schon 2030 – anstreben (Deutscher Bundestag und Bundesrat 2020; Lawitzky et al. 2020; Sächsisches Oberbergamt; Herpich et al., 2024). Besonders für die ostdeutschen Regionen bedeutet dies eine zweite große Transformation nach dem bereits erfolgten Strukturbruch der 1990er Jahre (Gürtler et al. 2020). Vor diesem Hintergrund unterstützt der Bund den durch den Kohleausstieg ausgelösten Strukturwandel in den Braunkohlerevieren bis zum Jahr 2038 mit insgesamt 40 Milliarden Euro und schafft durch das Strukturstärkungsgesetz Planungssicherheit und Fördermittel über einen Zeitraum von 20 Jahren (Deutscher Bundestag und Bundesrat 2020).

Gleichzeitig zeigt die Praxis, dass finanzielle Mittel allein nicht ausreichen: Die Wirksamkeit strukturpolitischer Maßnahmen hängt maßgeblich von der Ausgestaltung der Entscheidungsprozesse ab. Instrumente wie Strukturfonds, Innovationsförderung und Infrastrukturinvestitionen bilden das Fundament für gezielte Entwicklungsimpulse. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen hängt jedoch von der Entscheidungsarchitektur der Prozesse ab (Thaler et al. 2022).

Zahlreiche Befunde aus der Regionalentwicklungsforschung weisen darauf hin, dass Transparenz, Nachvollziehbarkeit und die systematische Einbindung lokaler Perspektiven zentrale Voraussetzungen für gelingende Transformationsprozesse sind (Radtke & Löw Beer 2024; Zikargae et al. 2022). Gleichzeitig zeigen Studien, dass mangelnde Transparenz und unklare Entscheidungswege das Vertrauen in staatliche Institutionen schwächen können (Grimmelikhuijsen et al. 2013; König et al. 2024). Diese Bedingungen spielen gerade in Kohleregionen eine besondere Rolle, da hier Unsicherheit, komplexe Interessenlagen und kulturelle Lock-ins (d.h. festgefahrene Denk- und Handlungsmuster) häufiger auftreten (Biddau et al. 2024; Krüger et al. 2022).

Vor diesem Hintergrund steigt der Bedarf an Instrumenten, die komplexe regionale Entwicklungen sichtbar machen, Daten systematisch integrieren und politische Maßnahmen evidenzbasiert vorbereiten können. Digitale Abbilder, wie digitale oder statistische Zwillinge, bieten hierfür ein vielversprechendes technologisches Fundament. Sie ermöglichen es, räumliche, wirtschaftliche, soziale und ökologische Entwicklungen gemeinsam abzubilden, Entwicklungen zu simulieren und Entscheidungsfolgen transparent darzustellen. Während digitale Zwillinge bereits in Industrie und urbaner Planung erprobt sind (z. B. Kritzinger et al. 2018; Weber et al. 2022), ist ihre Anwendung in der Regionalentwicklung – insbesondere für die Steuerung von Wirtschafts- und Innovationsaktivitäten – bislang wenig präzisiert. Dieses Impulspapier widmet sich daher der zentralen Frage: **Wie können digitale Zwillinge politische Entscheidungsträger:innen bei der Steuerung regionaler Strukturwandelprozesse unterstützen?** Zur Beantwortung dieser Leitfrage erfolgt die Analyse in zwei Schritten:

1) Literaturbasierte Perspektive

- Wie tragen digitale Zwillinge zur Verbesserung des Verständnisses komplexer regionaler Wirtschafts- und Innovationssysteme und der politischen Steuerung bei?
- Welche funktionalen und technischen Anforderungen müssen digitale Zwillinge erfüllen, um als wirksame Steuerungsinstrumente in Strukturwandelregionen zu fungieren?

2) Basierend auf einer systematischen Analyse von 60 Anwendungen werden zwei weiterführende Fragen untersucht:

- Welche funktionalen Schwerpunkte dominieren bestehende digitale Zwillinge, und inwiefern entsprechen diese den Anforderungen von Regionen im Strukturwandel?
- Welche Datenquellen und Modellierungsansätze nutzen bestehende digitale Zwillinge, und welche Daten fehlen, um regionale Transformationsprozesse systemisch abzubilden?

Ziel dieses Beitrags ist es, eine fundierte Grundlage für den Einsatz digitaler und statistischer Zwillinge in der Regionalentwicklung zu schaffen. Er richtet sich an politische Entscheidungsträger:innen, Verwaltungen, Wirtschaftsförderungen und regionale und interessierte Akteure, die vor der Aufgabe stehen, komplexe Transformationsprozesse strategisch, vorausschauend und transparent zu gestalten. Wissenschaftlich erweitert der Beitrag das Methodenspektrum der Regionalforschung und zeigt, wie digitale Technologien genutzt werden können, um sozioökonomische Systeme fundierter zu analysieren und politische Steuerung datenbasiert zu unterstützen. Im weiteren Verlauf des Impulspapiers werden zunächst zentrale Begriffe und theoretische Grundlagen rund um den Sammelbegriff digitale Abbilder erläutert. Darauf aufbauend folgt eine systematische Analyse von 60 bestehenden Anwendungen, die wesentliche Einsichten zu funktionalen Schwerpunkten, Daten- und Modellierungsansätzen liefert. Abschließend werden Implikationen für Politik und Verwaltung abgeleitet, die aufzeigen, wie digitale Zwillinge künftig zur Stärkung strategischer Entscheidungsprozesse im Strukturwandel beitragen können.

2 Digitale Zwillinge: Bedeutung für die Zukunft der Regionalentwicklung

Die Begriffe „Digitales Abbild“ sowie „Digitaler Zwilling“ finden vielerorts Anwendung, ob bei der Entwicklung von Fusionskraftwerken, der industriellen Fertigung oder der Raumplanung – und bleiben dementsprechend unscharf¹. Im folgenden Abschnitt soll daher erläutert werden, welches Verständnis von digitalen Zwillingen für Anwendungen in der Regionalentwicklung zielführend ist. Davon ausgehend werden zentrale Herausforderungen für ihren Einsatz (2.2) und ihre Potenziale für die Wirtschafts- und Innovationspolitik (2.3) aufgezeigt. Schließlich werden technische und funktionale Anforderungen für digitale Zwillinge in der Regionalentwicklung aufgeführt.

2.1 Definition des Begriffs „Digitaler Zwilling“ – Begriffe und Unterschiede

Um eine gemeinsame Sprache für Politik, Verwaltung, Wirtschaft sowie regionale und interessierte Akteure zu schaffen, werden im Folgenden zentrale Begriffe rund um den Sammelbegriff digitale Abbilder klar definiert und voneinander abgegrenzt. Diese begriffliche Basis ist notwendig, um das Potenzial solcher Modelle für die regionale Transformationspolitik nachvollziehbar und konsistent einordnen zu können.

Digitale Zwillinge werden in der Forschung als virtuelle Abbilder physischer Objekte, Prozesse, Systeme oder sogar eines ganzen Raumes (z. B. Stadt, Region, Infrastruktur oder Umwelt) verstanden, die in Echtzeit mit ihren realen Gegenständen gekoppelt sind und deren Zustand laufend widerspiegeln (vgl. Abdelrahman et al. 2025; Masoumi et al. 2023; Shafik 2024). Digitale Zwillinge integrieren Sensordaten, Modelle und Analysewerkzeuge, um physische Prozesse kontinuierlich abzubilden und zu simulieren, häufig mit dem Ziel, Entscheidungen zu unterstützen oder vorherzusagen (Mishra et al. 2024; Mythily et al. 2024; Suganya et al. 2022). Digitale Zwillinge bestehen aus drei grundlegenden Elementen: einer physischen Entität, ihrer digitalen Repräsentation sowie einer Verbindung, die einen bidirektionalen Datenaustausch ermöglicht (Ricci et al. 2022).

Historisch entstanden digitale Zwillinge in datenintensiven Hightech-Sektoren wie der Luft- und Raumfahrt, bevor sie in der industriellen Fertigung, im Bauwesen und später in urbanen Kontexten Anwendung fanden (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2024). Der Begriff „Digital Twin“ selbst wurde von Michael Grieves im Kontext des Product Lifecycle Managements geprägt (Grieves 2014). In der industriellen Produktion dient der digitale Zwilling vor allem dazu, reale Systeme durch die Kopplung aus Sensordaten, Simulationen und mathematischen Modellen zu optimieren und ihr Verhalten in Echtzeit vorherzusagen (Kritzinger et al. 2018).

Neben dem Konzept der digitalen Zwillinge wird in der Literatur verstärkt der Begriff des **Statistischen Zwillings** verwendet (siehe Tabelle 1). Während digitale Zwillinge auf kontinuierliche Synchronisierung durch Echtzeitdaten angewiesen sind, modellieren statistische Zwilling-Systeme auf Grundlage statistischer Muster, Wahrscheinlichkeiten oder strukturähnlicher Daten. Sie nutzen Surrogat- oder „reduced-order“-Modelle, um komplexe Systeme mit geringeren Datenanforderungen abzubilden und ermöglichen dadurch effiziente Simulationen mit geringem Rechenaufwand (Kim et al. 2024; Mohamed et al. 2025; Muñoz 2022).

¹ Beispiele für Digitale Zwillinge fernab der Regionalentwicklung: 1) In der Forschung als Abbild eines Stellarator-Fusionskraftwerks (Warmer, F. (2021). A digital twin of a stellarator fusion power plant (Research report). Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. https://www.ipp.mpg.de/5258463/research_report_18029318?c=4831660), 2) Maschinen in der industriellen Fertigung (Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation IOSB. (n.d.). Digital twin systems – the key concept for Industrie 4.0. Abgerufen am 28.01.2026, unter <https://www.iosb.fraunhofer.de/en/business-units/automation-digitalization/digital-twin.html>), 3) Anwendungen zur Bürgerbeteiligung (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (n.d.). Der Digital Twin als Grundlage für 3D-Planung und Bürgerbeteiligung (Smart Urban Planning). Abgerufen am 28.01.2026, unter <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/GAIA-X-Use-Cases/3d-planungsplattform.html>)

Tabelle 1: Abgrenzung digitaler und statistischer Zwilling

Kategorie	Digitaler Zwilling	Statistischer Zwilling
Modellfokus	Echtzeitabbildung physischer Systeme	Statistische Replikation von Mustern
Datenbasis	Echtzeit-Sensordaten, kontinuierliche Synchronisation (Mishra et al. 2024)	Statistische Daten, Surrogatmodelle (Muñoz 2022)
Modellfidelity	Hoch, detailliert	Niedriger, aber skalierbar
Rechenaufwand	Hoch (Mohamed et al. 2025)	Niedrig bis moderat
Einsatzgebiete in der Regionalentwicklung	Infrastruktur, Städte, Produktion	große Regionen, Datenknappheit, Prognosen
Relevanz für Strukturwandel	punktueller, datensatte Räume	großräumige, heterogene Transformationsregionen

In der Regionalentwicklung treffen die Konzepte der digitalen und statistischen Zwillinge jedoch auf besondere Bedingungen: hohe Heterogenität, viele Akteursgruppen und eine oft lückenhafte Datenbasis (siehe auch Tabelle 10). Um digitale Zwillinge unter diesen Rahmenbedingungen präziser einzuordnen, lässt sich das Spektrum in der Regionalentwicklung weiter strukturieren, indem drei etablierte Kategorien unterschieden werden: (1) Geobasiszwillinge, (2) Lokale digitale Zwillinge und (3) Digitale Urbane Zwillinge.

Geobasiszwillinge bilden die physische Welt anhand amtlicher Geobasisdaten wie Liegenschaftskatastern oder Geländemodellen nach. Sie stellen die verbindliche räumliche Grundlage bereit, auf der weiterführende digitale Zwillingmodelle aufbauen (Schubbe et al. 2023). Digitale Zwillinge erweitern diese Grundlagendaten durch dynamische, zeitabhängige und prozessbezogene Informationen.

Lokale digitale Zwillinge sind datenbasierte Modelle von Städten oder Regionen, die Echtzeitinformationen aus Sensoren, Verwaltungsdaten und weiteren Quellen integrieren, um komplexe Zusammenhänge sichtbar und analysierbar zu machen. Sie dienen als Entscheidungsgrundlage in urbaner Planung, Infrastruktursteuerung, Energie- und Umweltmanagement und ermöglichen die virtuelle Simulation politischer Maßnahmen, bevor diese umgesetzt werden. Gleichzeitig können implementierte Maßnahmen kontinuierlich evaluiert werden (Charalabidis et al. 2025).

Digitale urbane Zwillinge stellen eine spezialisierte Form der lokalen digitalen Zwillinge dar. Sie bilden sowohl materielle Bestandteile wie Gebäude, Straßen oder Infrastrukturen als auch immaterielle Prozesse wie Verwaltungsabläufe, Bürgerbeteiligungsformate oder Verkehrsdynamiken ab (Weber et al. 2022). Digitale urbane Zwillinge verbinden vielfältige dynamische Prozesse und algorithmisierte Daten, um städtische Systeme ganzheitlich abzubilden.

Erste Ansätze zeigen, dass das Spektrum der digitalen Zwillinge in der Regionalentwicklung zunehmend auf kleinere Gemeinden, Landkreise oder agrarisch geprägte Regionen übertragen wird (Ellul et al. 2024; Viale Pereira et al. 2023). Diese Entwicklungen verdeutlichen, dass viele Funktionen lokaler digitaler Zwillinge grundsätzlich auch für regionalwirtschaftliche Steuerung nutzbar sind – jedoch bisher kaum systematisch für ganze Regionen konzeptionell weiterentwickelt wurden. Somit existiert bisher für nicht-urbane Räume, periphere Gebiete oder großflächige Strukturwandelregionen kein konsolidierter Begriff eines explizit „regionalen digitalen Zwilling“. Für großräumige und heterogene Regionen, in denen Echtzeitdaten selten vollständig verfügbar sind, bieten statistische Zwillinge ein besonders relevantes und praktikables Konzept. Ein solches Konzept für die Regionalentwicklung sollte somit sowohl die Logik der digitalen Zwillinge für spezifische Anwendungsfälle als auch die statistischen Zwillinge für großräumige, heterogene Entwicklungen in Transformationsregionen umfassen. Für den weiteren Verlauf dieses Beitrags verwenden wir den Begriff „digitaler Zwilling“ als vereinfachende Klammer für alle in der Regionalentwicklung relevanten Zwillingansätze – unabhängig von ihrer konkreten Ausprägung (z. B. Geobasis-, lokale oder urbane Zwillinge) und der zugrunde liegenden Modelllogik (echtzeitgekoppelt oder statistisch/surrogatbasiert) – sofern sie regionale Strukturen

und Transformationsdynamiken datenbasiert abbilden, analysieren und für Entscheidungsprozesse nutzbar machen.

2.2 Zentrale Herausforderungen in der Regionalentwicklung und der Beitrag digitaler Zwillinge

Regionalentwicklung in Transformationsräumen ist durch eine Vielzahl komplexer Herausforderungen geprägt, die ökonomische, soziale, kulturelle, ökologische und technologische Dimensionen miteinander verflechten. Diese Vielschichtigkeit erschwert es politischen Entscheidungsträger:innen erheblich, regionale Entwicklungen konsistent zu bewerten, Risiken zu erkennen oder geeignete Maßnahmen abzuleiten und zu implementieren. Die Forschung zu Strukturwandelregionen – insbesondere in ehemaligen Kohlerevieren – zeigt, wie eng diese Herausforderungen miteinander verwoben sind und wie schnell Fehlentscheidungen langfristige negative Dynamiken verstärken können. Zu den fünf zentralen Hürden zählen (1) ökonomische und demografische Entwicklungen, (2) Governance- und Steuerungsfragen, (3) psychosoziale und kulturelle Faktoren, (4) Umwelt- und Raumplanungskonflikte, und (5) technischen Herausforderungen.

Viele Regionen erleben Strukturbrüche infolge von **ökonomischen und demografischen Entwicklungen**, wobei Jobverluste, Deindustrialisierung und ausbleibenden privaten Investitionen hierbei eingeschlossen sind (Jürgens 2025; Oei et al. 2020). Diese Prozesse werden häufig begleitet von der Abwanderung junger Menschen, sinkenden Bevölkerungszahlen und einem zunehmenden Fachkräftemangel, der regionale Innovations- und Wirtschaftspotenziale weiter einschränkt (Krommyda et al. 2024). Gleichzeitig bestehen vielerorts starke Abhängigkeiten von wenigen Leitunternehmen oder Branchen, was die Anfälligkeit gegenüber wirtschaftlichen Schocks verstärkt und die Resilienz schwächt (Szumilas-Kowalczyk et al. 2022).

Neben wirtschaftlichen und demografischen Faktoren stellen **Governance- und Steuerungsfragen** eine weitere zentrale Herausforderung dar. In vielen Transformationsregionen erschweren mangelnde Transparenz, komplexe Interessenlagen und begrenzte Beteiligungsmöglichkeiten die Entwicklung konsensfähiger Strategien (Radtke et al. 2024). Besonders auffällig ist die geringe Einbindung junger Menschen sowie lokal betroffener Gruppen, obwohl diese zentrale Stakeholder des Wandels sind (Löw-Beer et al. 2024).

Einen weiteren wichtigen Block bilden **psychosoziale und kulturelle Faktoren**. Viele Transformationsregionen sind stark durch traditionelle Industrien geprägt, die über Jahrzehnte Identität, Wohlstand und sozialen Zusammenhalt geschaffen haben. Der Verlust solcher Strukturen führt nicht nur zu ökonomischen Verwerfungen, sondern auch zu kulturellen Lock-in-Effekten, Skepsis gegenüber Wandel und sozialer Verunsicherung (Biddau et al. 2024). Diese Dynamiken gehen häufig mit psychischen Belastungen einher, etwa durch Zukunftsunsicherheit, Umsiedlungen oder Konflikte um Flächennutzung (Krüger et al. 2022). Parallel dazu ist in vielen Regionen ein Vertrauensverlust gegenüber politischen Institutionen zu beobachten, der partizipative Prozesse erschwert und die Legitimität politischer Entscheidungen untergraben kann (Baron et al. 2024, Rodríguez-Pose 2018).

Auch **Umwelt- und Raumplanungskonflikte** prägen den Strukturwandel erheblich. Landschaften und Flächen, die durch Bergbau oder andere Industrien unwiderruflich verändert und belastet wurden, erfordern kostenintensive Renaturierungsmaßnahmen, bevor sie einer Nutzung zugeführt werden können (Pambudi et al. 2025). Gleichzeitig entstehen neue Konflikte zwischen Energieinfrastruktur, Naturschutz und Siedlungsentwicklung, die komplexe Abwägungsprozesse erfordern (Wiehe et al. 2020). Der Ausbau erneuerbarer Energien erhöht zusätzlich den Druck auf verfügbare Flächen, während die lokale Opposition gegen Wind- oder Solaranlagen vielerorts wächst (Pfeiffer et al. 2025). Während die fossilen Energien mit der Versorgung von lokaler Beschäftigung und Wertschöpfung verbunden ist, gehen von erneuerbaren Energien nur sehr geringe Beschäftigungseffekte aus. Stattdessen werden sie als meist fremdbestimmte Bedrohung des lokalen Wohlstands identifiziert (Morton et al. 2016; Rosa-Luxemburg-Stiftung 2019).

Schließlich ist der Strukturwandel auch von **technischen Herausforderungen** geprägt. Dazu gehören die Integration erneuerbarer Energien, die Sicherstellung von Netzstabilität und die Entwicklung neuer Speichertechnologien, die für das Gelingen der Energiewende zentral sind (Bouchard et al. 2023). Gleichzeitig fehlt es in vielen Verwaltungen an interoperablen digitalen Datenstrukturen, die für koordinierte regionale Entwicklungsprozesse notwendig wären. Ergänzend besteht ein hoher Bedarf an smarten und flexiblen Infrastrukturen in Bereichen wie Energie, Mobilität und Raumplanung, um Transformationsprozesse effizient zu begleiten und vorausschauend zu gestalten.

Digitale Zwillinge helfen, diese Herausforderungen zu verstehen: Zwillinge eignen sich besonders gut, um die Komplexität regionaler Transformationsprozesse sichtbar und analysierbar zu machen. Ihre Kernfunktion besteht darin, heterogene Daten zusammenzuführen und komplexe Zusammenhänge transparent darzustellen (Charalabidis et al. 2025). Diese Entwicklung wird auch im sozioökonomischen Kontext zunehmend möglich, weil deutlich mehr Rechenleistung Simulationen in größerem Maßstab erlaubt, neue und dichtere Datenquellen digitale Spuren sozioökonomischer Aktivitäten erschließen und damit Analysen vom Aggregat hin zu akteurs- und prozessnäheren Perspektiven ermöglichen, und moderne Analyseverfahren (z. B. Netzwerkanalysen, Machine Learning, KI) komplexe Zusammenhänge besser identifizier- und interpretierbar machen.

Mit digitalen Zwillingen lassen sich regionale Transformationsprozesse nicht nur beschreiben, sondern auch in ihren Zusammenhängen besser erklären und in Szenarien durchdenken. Tabelle 2 führt die zuvor genannten Herausforderungen mit konkreten Analyse- und Unterstützungsbeiträgen digitaler Zwillinge zusammen.

Tabelle 2: Potenzielle Beiträge von digitalen Zwillingen zur Analyse komplexer Strukturen

Herausforderung	Beitrag digitaler Zwillinge	Relevante Literatur
Demografische Entwicklungen	Darstellung und Modellierung von Abwanderung, Fachkräfteangebot und Infrastrukturbedarf	Oei et al. 2020
Governance und Steuerungsfragen & technische Herausforderungen	Integration heterogener Datenquellen (Sensoren, Geodaten, Statistik) und systemische Modellierung u.a. von Wertschöpfungsketten, Pendlerbewegungen ermöglicht regionale Dynamiken zu verstehen Szenario-Simulationen für verschiedene Politik- oder Innovationsentscheidungen	Ellul et al. 2024; Schubbe et al. 2023 ; Masoumi et al. 2023; van Meerten et al. 2024
Psychosoziale und kulturelle Faktoren	Schaffung von mehr Transparenz durch Visualisierung des Status Quo sowie komplexer Zusammenhänge für Politik und Öffentlichkeit	Charalabidis et al. 2025
Umwelt und Raumplanungskonflikte	Darstellung, Analyse und Simulation von Flächennutzung, Energieinfrastruktur, Mobilitätsströmen	Wiehe et al. 2020

Zusammengefasst können digitale Zwillinge Folgendes ermöglichen:

- ein ganzheitliches Verständnis von Ursachen und Wirkmechanismen,
- die Erkennung von Risiken und Engpässen,
- den Vergleich regionaler Entwicklungspfade,
- eine datenbasierte Identifikation von Handlungsbedarfen,
- eine transparente Darstellung komplexer Wirkzusammenhänge,
- eine Grundlage für evidenzbasierte Kommunikation in Politik und Verwaltung.

Digitale Zwillinge schaffen somit eine analytische Grundlage, bevor politische Steuerung einsetzt – also eine Art Landkarte regionaler Transformationsprozesse.

2.3 Digitale Zwillinge als strategisches Werkzeug moderner Wirtschafts- und Innovationspolitik

Regionalentwicklung im Kontext von Strukturwandelprozessen ist eng mit der Entstehung neuer Innovations- und Wirtschaftsaktivitäten verknüpft (Koschatzky 2018). Regionen, die sich in Transformationsphasen befinden, stehen vor der Herausforderung, ökonomische Dynamiken neu auszurichten und dabei sowohl bestehende Strukturen zu bewahren als auch innovative Potenziale zu fördern. Innovationen – ob technologischer, organisatorischer oder sozialer Art – werden so zu einem zentralen Motor, um die Wettbewerbsfähigkeit von Regionen zu sichern und neue wirtschaftliche Perspektiven zu eröffnen. Regionalentwicklung bedeutet in diesem Sinne nicht nur räumliche Planung, sondern auch die aktive Gestaltung von Innovations- und Wirtschaftsprozessen, die regionale Akteure in gemeinschaftliche Transformationsstrategien einbinden.

Flourierende Innovations- und Wirtschaftsprozesse sind zudem eng mit Fragen politischer Steuerung verknüpft, da die **Legitimität** und Akzeptanz politischer Maßnahmen maßgeblich von deren Gestaltung und Wirksamkeit abhängen. Politische Akteure stehen dabei vor der Aufgabe, Prozesse von Innovation und Wirtschaftsentwicklung transparent zu organisieren. **Transparenz** bedeutet nicht nur nachvollziehbare Entscheidungswege, sondern auch den offenen Zugang zu Daten, Informationen und Analysen, die als Grundlage für politische Maßnahmen dienen (vgl. Pollermann 2021). Je stärker solche Transparenz gewährleistet wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Strategien von relevanten Stakeholdern mitgetragen und erfolgreich umgesetzt werden. Dies ist gerade in Prozessen des Strukturwandels von zentraler Bedeutung, wenn unterschiedliche Interessenlagen aufeinandertreffen und ein erhöhter Bedarf an Abstimmung und Vertrauen besteht. Empirische Studien zeigen, dass Transparenz das Vertrauen in staatliche Institutionen stärkt (vgl. Grimmelikhuijsen et al. 2013; König et al. 2024) und Stakeholder-Partizipation die Legitimität und Wirksamkeit regionaler Entwicklungsprozesse erhöht (vgl. Zikargae et al. 2022). Darüber hinaus gilt politisches Vertrauen als ein entscheidender Treiber regionaler Wirtschaftsentwicklung (Muringani et al. 2024).

Vor diesem Hintergrund ergänzen digitale Zwillinge klassische Governance-Modelle, insbesondere den Policy Cycle. Während der klassische Policy Cycle in Phasen wie Problemerkennung, Agenda Setting, Politikformulierung, Entscheidungsfindung, Umsetzung und Evaluierung untergliedert ist (vgl. Capano et al. 2020), bietet die datengetriebene Politikgestaltung neue Erweiterungsmöglichkeiten. Der Einsatz von Big Data Analytics erweitert den klassischen Policy Cycle zu einem „e-Policy Cycle“ (vgl. Höchtl et al. 2016). Dieser inkludiert zugleich, dass die Evaluierung nicht am Ende eines Policy-Zyklus steht, sondern als permanente Rückkopplung in Echtzeit erfolgt. Dadurch werden die politische Steuerung und Entscheidungsfindung zu einem dynamischeren, adaptiveren und kontinuierlich überprüfbareren Prozess – das sogenannte **Adaptive Governance**. Van Meerten et al. (2024) zeigen, dass digitale Zwillinge als ein Werkzeug der Big Data Analytics, nicht nur bei Umsetzung und Evaluation wirken, sondern bereits im Agenda Setting und in der Formulierungsphase eine zentrale Rolle spielen können. Sie ermöglichen es, Probleme sichtbar und quantitativ fassbar zu machen, verschiedene **Szenarien durchzuspielen** und somit Entscheidungsoptionen fundierter zu gestalten. Ebenso wird betont, dass durch Monitoring und Simulation in Echtzeit Rückkopplungen geschaffen werden, die Anpassungen und Steuerung während des gesamten Policy Cycles erlauben.

Empirische Studien zeigen zudem, dass digitale Zwillinge in der Regional- und Stadtentwicklung insbesondere für evidenzbasierte Entscheidungsfindung, Bürgerbeteiligung und die Steuerung komplexer Transformationsprozesse eingesetzt werden können und damit die **Koordination und Beteiligung** verschiedener Akteursgruppen erleichtert (vgl. Charalabidis et al. 2025; Temple et al. 2024; van Meerten et al. 2024).

Der besondere Mehrwert digitaler Zwillinge für eine moderne Wirtschafts- und Innovationspolitik lässt sich entlang folgender zentraler Beiträge zusammenfassen:

- **Legitimität & Transparenz:** Visualisierungen machen politische Entscheidungen nachvollziehbar und stärken damit Vertrauen und Akzeptanz.
- **Adaptive Governance:** Politische Maßnahmen können in Echtzeit überprüft und angepasst werden, anstatt sich auf statische, einmalige Analysen zu stützen.

- **Szenariobildung & vorausschauende Steuerung:** Politische Maßnahmen können virtuell getestet und verglichen werden, bevor reale Investitionen getätigt werden.
- **Koordination & Beteiligung:** Gemeinsame Datenplattformen erleichtern den Austausch zwischen Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft.

Digitale Zwillinge sind damit nicht nur Analyseinstrumente, sondern strategische Werkzeuge, die politische Entscheidungsprozesse strukturieren, partizipative Governance erleichtern und regionale Innovationsökosysteme stärken können. Sie unterstützen Regionen dabei, ihren Transformationsprozess aktiv zu gestalten, statt lediglich auf äußere Entwicklungen zu reagieren. **Dadurch entsteht eine neue Form datenbasierter, vorausschauender regionaler Transformationspolitik, die sowohl ökonomische Chancen als auch gesellschaftliche Akzeptanz im Blick behält.**

2.4 Technische und funktionale Anforderungen an digitale Zwillinge im regionalen Strukturwandel

Damit digitale Zwillinge ihr Potenzial für die regionale Transformationspolitik entfalten können, sollten sie spezifische technische, funktionale und governancebezogene Anforderungen erfüllen. Die Forschung zeigt, dass erfolgreiche Zwillingsmodelle dann eine besonders starke Wirkung entfalten, wenn sie eine Kombination aus (1) Interoperabilität, (2) Datenqualität, (3) organisatorischer Befähigung, (4) Modularität und Skalierbarkeit, (5) Human-on-the-loop und (6) Continuous Assurance erfüllen (Garske et al. 2024; Hansen et al. 2023; Möhring et al. 2022; Trauer et al. 2022).

Interoperabilität – Daten nahtlos verbinden: Die Integration verschiedener Datenquellen gilt als grundlegende technische Bedingung für den Aufbau komplexer digitaler Modelle (IEC 63278-1; ISO 23247-1; Liepert et al. 2025; OPC UA). Diese ist nur möglich durch Interoperabilität, welche die Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichen Quellen – etwa Energieversorgern, Verkehrsbetrieben, Statistikämtern, Kommunen oder Unternehmen ermöglicht. Gerade Transformationsregionen sind auf diese übergreifende Integration angewiesen, da wirtschaftliche, räumliche und soziale Entwicklungen eng miteinander verflochten sind. Für Regionen bedeutet das:

- Sie brauchen Zwillinge, die administrative, räumliche, wirtschaftliche und soziale Daten nahtlos verbinden, um systemische Abhängigkeiten sichtbar zu machen.

Datenqualität und Governance – Souveränität und Vertrauen sichern: Robuste Datenintegration und klare Governance-Strukturen sind entscheidend für alle Anwendungen von digitalen Zwillingen (Garske et al. 2024; Mureddu et al. 2025). Für Strukturwandelregionen gilt dies in besonderem Maße, da viele relevante Daten sensibel sind – etwa wirtschaftliche Kennzahlen, Unternehmensdaten, Flächennutzungsdaten oder sozioökonomische Indikatoren. Zentrale Anforderungen für Regionen umfassen daher:

- Datenharmonisierung, um statistische, kommunale und geodätische Daten kombinierbar zu machen.
- Datensouveränität, damit Kommunen und regionale Akteure Kontrolle über die Nutzung ihrer Daten behalten.
- Datenschutz und Cybersicherheit, als zentrale Policy-Anforderungen.
- Nachvollziehbarkeit und Transparenz darüber, falls Algorithmen politische Entscheidungen beeinflusst oder gar getroffen haben (Wang 2025).

Modularität und Skalierbarkeit – Start small, scale smart: Ein Digitaler Zwilling wird nicht in einem Tag erbaut. Modulare Architekturen erleichtern die Entwicklung sowie den nachhaltigen Einsatz von digitalen Zwillingen (Dalibor et al. 2022; Juarez et al. 2025). In regionalen Transformationsprozessen wandeln sich die Bedarfe an einen digitalen Zwilling zwangsläufig.

- Modularität ermöglicht das organische Wachstum von Digitalen Zwillingen und die Ergänzung neuer Funktionalitäten.

Organisatorische Befähigung – Fähigkeiten und institutionelle Verankerung aufbauen: Die Forschung zu digitalen Zwillingen zeigt, dass technologische Lösungen häufig nicht an der Technik scheitern, sondern an organisationalen Barrieren sowohl auf entwickelnder als auch anwendender

Seite, welche die Nutzung und Nutzbarkeit beeinträchtigen (Bandara et al. 2023; Pujari et al. 2023). Für regionale Zwillinge bedeutet das:

- Anwender:innen, also meist Verwaltungen, benötigen Datenkompetenzen, um Modelle und Ergebnisse zu verstehen und anzuwenden.
- Es braucht klare Verantwortlichkeiten
- Regionen benötigen Ressourcen und Zeit, da ein Zwilling eine langfristige Infrastruktur ist und kein kurzfristiges Projekt. Im Laufe des Projekts ist daher die Pflege von Datenbanken, die Sicherstellung der Funktionalität und die Lösung von Nutzendenproblemen notwendig.

Human-on-the-loop – Entscheidungshoheit bleibt in den Händen der Politik: Die Forschung betont, dass digitale Zwillinge immer in einem Mensch-Technik-Verhältnis stehen und politische Entscheidungen nicht ersetzen dürfen (Cardamone et al. 2024; Palmer et al. 2025), um bspw. strukturelle Biases, die in den vorhandenen Daten liegen, nicht weiter zu tragen. Für Regionalpolitik heißt das:

- Digitale Zwillinge unterstützen Entscheidungen, aber sie treffen sie nicht.
- Menschen bleiben auf der Steuerungsebene („on-the-loop“) und greifen aktiv ein („in-the-loop“).
- Politische Legitimität entsteht zum einen durch erklärbare, erklärte und nachvollziehbare Modelle – und durch Menschen, die Verantwortung übernehmen.

Continuous Assurance – Zwillinge müssen aktuell, valide und vertrauenswürdig bleiben: Digitale Zwillinge benötigen eine kontinuierliche Qualitätssicherung (Eriksson et al. 2023; Hansen et al. 2023). Modelle müssen regelmäßig aktualisiert, validiert und auf ihre Prognosequalität geprüft werden. Für Regionen bedeutet das:

- Zwillinge sind keine einmalige Investition, sondern eine dauerhafte digitale Infrastruktur, deren Qualität über Zeit gesichert werden muss.

Zwischenfazit

Ausgehend von der Frage „Wie tragen digitale Zwillinge zur Verbesserung des Verständnisses komplexer regionaler Wirtschafts- und Innovationssysteme und der politischen Steuerung bei?“ zeigt die vorangehende Diskussion, dass digitale Zwillinge es durch die Integration heterogener Datenquellen ermöglichen, systemische Zusammenhänge zwischen ökonomischen, demografischen, räumlichen und sozialen Entwicklungen transparent zu machen. Damit schaffen sie eine analytische Grundlage für evidenzbasierte Entscheidungen. Als strategische Werkzeuge der Politik erweitern sie klassische Governance-Modelle, da sie nicht nur in der Evaluierungsphase wirken, sondern bereits im Agenda Setting und in der Politikformulierung Probleme sichtbar machen, Szenarien simulieren und Rückkopplungen in Echtzeit ermöglichen können.

Zugleich wurde deutlich, dass digitale Zwillinge vor allem dann als wirksame Steuerungsinstrumente in Strukturwandelregionen fungieren können, wenn sie spezifische funktionale und technische Anforderungen erfüllen. Diese betreffen sowohl den Umgang mit Daten als auch die organisationale Einbettung von digitalen Zwillingen in die alltägliche Arbeit. Damit wurde die Frage: „Welche funktionalen und technischen Anforderungen müssen digitale Zwillinge erfüllen, um als wirksame Steuerungsinstrumente in Strukturwandelregionen zu fungieren?“ beantwortet.

Es stellt sich jedoch weiterhin die Frage, welche funktionalen Schwerpunkte in bestehenden digitalen Zwillingen in der Praxis tatsächlich dominieren und inwieweit diese mit den identifizierten Anforderungen von Strukturwandelregionen übereinstimmen. Ebenso ist noch zu klären, auf welche Datenquellen und Modellierungsansätze gegenwärtige Anwendungen zurückgreifen und welche systematischen Datenlücken einer ganzheitlichen Abbildung regionaler Transformationsprozesse noch entgegenstehen.

3 Datengrundlagen und methodisches Vorgehen der Analyse

Die empirische Bestandsaufnahme digitaler Zwillinge untersucht systematisch die Anwendungszwecke, die Funktionen und Nutzenden. Darüber hinaus wurde analysiert, wie diese Technologien dazu beitragen, regionale Transformations- und Strukturwandelprozesse besser zu verstehen, Prognosen zu erstellen und Simulationen durchzuführen, die politische Entscheidungsträger:innen unterstützen.

Die Datenerhebung erfolgte in zwei Schritten: Im ersten Schritt wurde eine breite primäre Recherche durchgeführt, deren Basis Suchabfragen über wissenschaftliche Suchmaschinen wie Google Scholar und Scopus sowie Desk Research einschloss. Dabei wurden sowohl wissenschaftliche Artikel, die sich mit der Differenzierung und Systematisierung digitaler Zwillinge auseinandersetzen, als auch praxisbezogene Darstellungen und Projektwebseiten herangezogen. Bei den praxisrelevanten Daten wurde ein besonderer Fokus auf die sogenannten Schirmprojekte, die mehrere kommunale oder regionale Initiativen auf einer Plattform bündeln und damit eine systematische Übersicht ermöglichen, gelegt. Hierzu zählen beispielsweise LEAD (<https://www.leadproject.eu/>), Connected Urban Twins (<https://www.connectedurbantwins.de/>) sowie TwinBy (<https://www.twinby.bayern/de/startseite>), die jeweils umfangreiche Auflistungen bestehender oder im Aufbau befindenden Zwillinge in verschiedenen Städten und Regionen bereitstellen.

Im zweiten Schritt wurden ausgehend von der oben diskutierten wissenschaftlichen Literatur klare Auswahlkriterien für die praktische Analyse abgeleitet. Diese umfassten:

- Räumlicher Bezug innerhalb Deutschlands (in Einzelfällen wurden auch internationale Good-Practice-Beispiele einbezogen);
- Explizite Bezeichnung als „Digitaler Zwilling“ oder „Statistischer Zwilling“ (Projekte mit reinen interaktiven Karten oder Datenvisualisierungen ohne diese Bezeichnung wurden ausgeschlossen);
- Bevorzugung bereits implementierter oder operationaler Systeme (in Ausnahmefällen wurden auch fortgeschrittene Planungsprojekte wie DigiZ-DE berücksichtigt);
- Ausschluss von Anwendungen aus Fertigung oder industrieller Produktion, da diese nicht dem Anwendungsfeld der Regionalentwicklung entsprechen;
- Aufnahme mehrerer Zwillinge aus einem geografischen Raum, sofern sie unterschiedliche thematische oder funktionale Schwerpunkte aufwiesen (beispielsweise in Aschaffenburg).

Insgesamt wurden 60 bestehende digitale Zwillinge in den Datenpool aufgenommen, wobei das Ziel war ein möglichst breites Spektrum abzudecken.

Im dritten Schritt erfolgte die Strukturierung und Kategorisierung der Daten zu den 60 Zwillingen in drei Phasen: Zuerst wurden für jeden Zwilling verschiedene Informationen (bspw. Ort, Anwendungsart, Typologie, Funktion) erhoben und tabellarisch erfasst. Dabei wurden insbesondere die von den Projektverantwortlichen selbst angegebenen Informationen berücksichtigt. Eine anschließende inhaltliche Analyse dieser Angaben ermöglichte die Bildung thematischer Cluster für Anwendungsgebiete (vgl. Tabelle 3). Zuletzt wurde die Zuordnung der digitalen Zwillinge zu den Anwendungsgebieten nochmals manuell nachjustiert, wobei in begründeten Fällen eine Mehrfachzuordnung erfolgte. Die Systematisierung und Zuordnung diente der vergleichenden Analyse und ermöglichte eine strukturierte Auswertung der unterschiedlichen Ziele, Funktionen und Datenquellen digitaler Zwillinge in der Regionalentwicklung.

4 Die Landschaft digitaler Zwillinge: Erkenntnisse aus 60 bestehenden Anwendungen für Regionen und Kommunen

4.1 Praxisbeispiele zur Anwendung digitaler Zwillinge

Die Analyse der 60 bestehenden digitalen Zwillinge zeigte, dass sich diese Zwillinge in Deutschland sehr unterschiedlich entwickeln und kein einheitliches Funktionsverständnis existiert. Die Spannweite reicht von umfassenden urbanen Plattformen über spezialisierte sektorale Anwendungen bis hin zu föderalen Initiativen, die Grundlagen für Standards und Skalierung schaffen. Aus den vorliegenden Projekten lassen sich drei zentrale Kategorien ableiten: (1) urbane digitale Zwillinge, (2) thematische Zwillinge und (3) regionale bzw. föderale Dachinitiativen.

Urbane digitale Zwillinge – etwa in Düsseldorf, Bremen, Hannover oder Kassel – bilden die sichtbarsten und technologisch ausgereiftesten Ansätze. Rund ein Drittel der Projekte fällt in diese Kategorie. Typisch ist die Bündelung mehrerer Anwendungsfelder, insbesondere in Stadtentwicklung, Mobilität, Infrastruktur sowie Klima und Umwelt. Diese Zwillinge integrieren vielfältige Datenquellen (Geobasisdaten, Sensordaten, Verwaltungs- und Modelldaten) und stellen diese über 3D-Visualisierungen bereit, die politische und planerische Entscheidungen deutlich erleichtern.

Spezialisierte **thematische Zwillinge** bilden mit etwa 40 % die größte Gruppe. Sie adressieren klar definierte kommunale Herausforderungen – etwa Starkregen und Hochwasser (Deggendorf-Plattling, Hof), Energie- und Wärmemanagement (Smart Region AUF), Mikroklima (Aschaffenburg), Verkehrsdatenanalyse (Schwandorf), Krisenmanagement (Schwabach GUZI) oder Gesundheitsversorgung (Krankenhauszweckverband Aschaffenburg-Alzenau). Diese Projekte zeigen, dass digitale Zwillinge dort entstehen, wo Kommunen präzise, simulationsbasierte Entscheidungswerkzeuge benötigen.

Eine dritte Gruppe umfasst **regionale und föderale Initiativen** wie DigiZ-DE oder den Digitalen Zwilling Sachsen (GeoSN). Hervorzuheben ist die bayerische TwinBy-Initiative, die mit über einem Dutzend kommunaler Anwendungen derzeit eines der umfassendsten Ökosysteme Deutschlands bildet. Bayern deckt nahezu alle relevanten Anwendungsfelder ab – von Mobilität über Energie und Umwelt bis hin zu Krisenmanagement – und zeigt, wie Landespolitik Innovationsräume aktiv gestalten kann.

Die systematische Auswertung der Anwendungsfelder (vgl. Tabelle 3) verdeutlicht klare Schwerpunkte:

- Über 80 % der Zwillinge adressieren Energie & Umwelt und Infrastruktur,
- rund 60 % befassen sich mit Mobilität oder Stadtentwicklung,
- etwa 15% integriert Bürgerbeteiligung & Transparenz,
- Krisen- und Risikomanagement ist in reichlich 15% vertreten,
- Anwendungen in Wirtschaft, Gesundheit oder Bildung & Kultur bleiben Ausnahmefälle.

Diese Muster zeigen: Digitale Zwillinge entstehen bislang vor allem dort, wo Kommunen vor raumbezogenen, infrastrukturellen oder klimabezogenen Herausforderungen stehen. Transformationsdimensionen wie Wirtschaft, Innovation oder Arbeitsmarkt werden bisher kaum berücksichtigt.

Insgesamt wird deutlich, dass Zwillinge sowohl als integrierte Plattformen für kommunale Querschnittsaufgaben als auch als spezialisierte Problemlösungen eingesetzt werden. Diese Vielfalt eröffnet großes Potenzial, macht aber auch sichtbar, dass Modelle bisher sehr unterschiedlich ausgeprägt sind und nur wenige Ansätze bereits skalierbar erscheinen. Darauf aufbauend untersuchen die folgenden Abschnitte systematisch die funktionalen Schwerpunkte sowie die Daten- und Modellierungslogiken der bestehenden Zwillinge.

Zur weiteren Veranschaulichung werden anschließend zwei Good Practice-Beispiele vorgestellt: „Düsseldorf in 3D“ als integrierter urbaner digitaler Zwilling sowie die „Smart Region AUF“ mit ihrem digitalen Zwilling und als sektorale, regional verankerte Anwendung. Es wurden zwei Good Practice-Beispiele gewählt, die für die Autor:innen frei zugänglich sind.

Tabelle 3: Übersicht der analysierten Digitalen Zwillinge

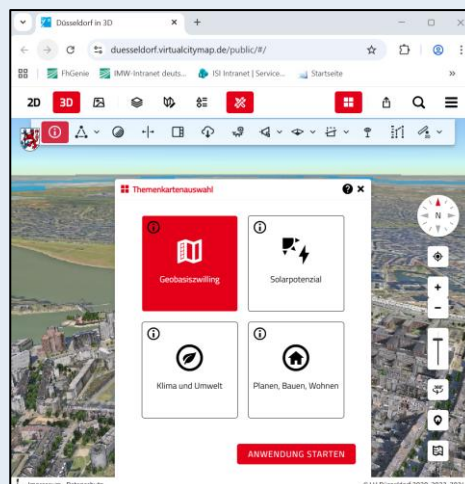
Nr.	Name	Stadtentwicklung	Mobilität	Infrastruktur	Energie & Umwelt	Bürgerbeteiligung & Transparenz	Krisen- & Risikomanagement	Gesundheit	Bildung & Kultur	Wirtschaft
1	TwinBy Klimadashboard	x			x					
2	TwinBy Krankenhauszweckverband Aschaffenburg-Alzenau							x		
3	Smart City Bamberg	x		x					x	
4	Bremen 3D	x	x	x	x					
5	Bremen 3D – Solar				x					
6	TwinBy Deggendorf-Plattling			x	x					
7	Geoportal.de		x	x	x			x	x	x
8	DUET Project Flandern	x	x		x		x			
9	DUET Project Pilsen	x			x	x		x		
10	DUET Project Athen	x	x		x					
11	Okay				x					
12	DigiZ-DE - Digitale Zwilling Deutschland	x	x		x					
13	Smart City Dortmund	x		x						
14	Urbaner digitaler (Starkregen-)Zwilling Dresden				x		x			
15	LEAD Madrid (Low-Emission Adaptive last mile logistics supporting on Demand economy)			x						x
16	LEAD Den Haag			x						x
17	LEAD Lyon			x						x
18	LEAD Porto			x						x
19	LEAD Budapest			x						x
20	LEAD Oslo			x						x
21	Virtual Gothenburg	x								
22	Zürich 4D	x								
23	Destination Earth	x			x		x			
24	Düsseldorf in 3D	x		x		x				
25	Geoportal Düsseldorf	x		x						
26	energyTWIN			x	x					
27	Digitaler Zwilling Essen		x		x					
28	TwinBy FBI (Feldkirchner Building Intelligence)			x	x					
29	TwinBy Forchheim	x	x	x						
30	Digitaler Zwilling Verwaltungsgemeinschaft Fuchstal			x	x					
31	Kinderstadtplanung Grafing								x	
32	TwinBy Haar	x	x	x						
33	HAL-Plan	x		x	x					
34	Geoportal Hamburg	x	x			x				
35	Urbaner Digitaler Zwilling Hamburg (CUT)	x	x	x						
36	Cockpit Städtische Infrastruktur (CoSI)	x		x						
37	Digitaler Zwilling - Hannover 3D	x		x	x					
38	Digitaler Zwilling Landkreis Hof				x		x			
39	SAVeNow	x	x	x						
40	TwinBy Markt Isen			x	x					
41	Kassel in 3D: der digitale Zwilling	x			x	x			x	
42	TwinBy Kempten	x				x				
43	TwinBy Landkreis Kulmbach				x	x	x			
44	TwinCity3D	x	x		x					
45	Urbaner Digitaler Zwilling Leipzig (CUT)		x							
46	Digitaler Zwilling München (CUT)	x	x		x					
47	TwinBy NordAllianz	x	x		x	x	x			
48	TwinBy Neunburg vorm Wald	x		x						
49	Geoportal NRW						x			
50	TWIN4ROAD		x	x						
51	TwinBy Digitales Gedächtnis								x	
52	Digitaler Zwilling Sachsen (GeoSN)		x	x	x					
53	TwinBy GUZI (Goldene Urbane Zwillinginformation)			x	x		x			
54	TwinBy Schwandorf		x							
55	TwinBy Mobilitätshaus	x		x				x		
56	TwinBy Smart Village Weisendorf			x	x					
57	Virtual Singapore	x		x	x	x	x			x
58	Siemens City Performance Tool (CyPT)	x			x					
59	Barcelona: The 15-minute city?	x	x	x	x					
60	DigiTal Zwilling	x	x		x	x	x			

Good Practice I

Düsseldorf in 3D

Kurzprofil

Düsseldorf in 3D ist eine interaktive 3D-Karte der Stadt, in der Gebäude, Straßen und Stadtstruktur virtuell abgebildet sind. Nutzende können sich frei bewegen, Eingaben machen und z. B. Gebäude auswählen, Informationen abrufen oder Szenarien planen – beispielsweise zu Solarpotenzialen, Stadtentwicklung oder Infrastruktur. Die Plattform visualisiert komplexe städtische Daten anschaulich und erlaubt so sowohl Bürger:innen als auch Fachakteur:innen, Stadtentwicklungs- oder Planungsfragen leichter zu verstehen und gemeinsam zu diskutieren.



Screenshot

Typ des Zwillings	Digitaler Zwilling, Geobasiszwilling, 3D-Stadtmodell
Räumliche Ebene	Stadtgebiet Düsseldorf
Datenbasis	Amtliche 3D-Geodaten, Datenlizenz Deutschland – Zero – Version 2.0, offene Standards und 3D-Geodateninfrastrukturen (u. a. CityGML, 3DCityDB, Open Standards)

Zweck & Hauptfunktionen

- **Basisfunktion „Geobasiszwilling“:** Bildet die Stadt in präziser 2D- und 3D-Geometrie ab und stellt grundlegende amtliche Geodaten bereit – etwa Gebäude, Gelände, Straßen, Flächen und Katasterinformationen. Er dient als verlässliche räumliche Grundlage.
- **Solarpotential:** 3D-Web-Applikation zur Solarpotenzialanalyse von Dächern, Fassaden und Freiflächen ermöglicht die Berechnung von Sonneneinstrahlung, Photovoltaik-Ertrag, CO₂-Einsparung und Wirtschaftlichkeit.
- **Klima und Umwelt:** Diese Funktion zeigt, wie Starkregen, Lärm und lokale Klimafaktoren die Stadt beeinflussen. Sie visualisiert Risiken wie Überflutungsflächen, Schallemissionen und Wärmebelastungen und macht damit sichtbar, wo Belastungen entstehen.
- **Planen, Bauen Wohnen:** Digitales Planungswerkzeug, das Bauleitplanung und Stadtplanung in einer interaktiven 3D-Umgebung sichtbar macht. Es ermöglicht, Bebauungspläne, Nutzungsarten, Bauhöhen, Abstandsflächen und geplante Entwicklungen realitätsnah zu visualisieren. Nutzende können u.a. prüfen, wie neue Gebäude sich räumlich auswirken.

Governance & Betrieb

- Auftraggeber & Datenlieferant: Vermessungs- und Katasteramt Düsseldorf
- Technische Umsetzung: virtualcitysystems GmbH

Warum ist es ein Highlight?

- Multifunktional: Verknüpft Klima, Umwelt, Solar und Bauleitplanung in einem System.
- Transparenz für Politik & Öffentlichkeit: Visualisiert frei zugänglich Planung, Risiken und Entwicklungen klar und nachvollziehbar.
- Zukunftsorientiert: Unterstützt zentrale Themen wie Klimaresilienz, Wohnen, Infrastruktur und Stadtentwicklung.
- Standardbasiert: Setzt auf offene Standards und offene Daten – gute Übertragbarkeit auf andere Regionen.
- virtualcitysystems GmbH wird von mehreren Städten genutzt, u.a. Kulmbach und Kassel

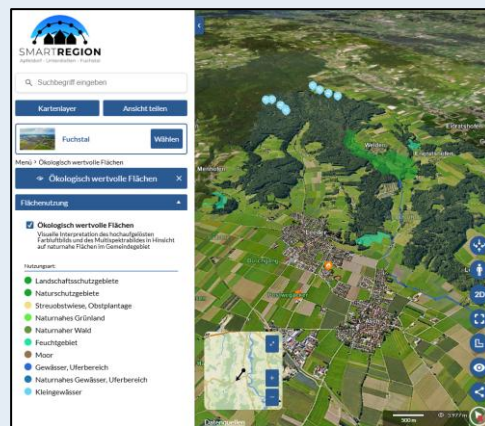
Quellen: Virtual City Systems, Düsseldorf in 3D – Digitales Stadtmodell, <https://duesseldorf.virtualcitymap.de/public/#/> (abgerufen 7. Jan. 2026).; Virtual City Systems, VC Map v6.2 – Dokumentation <https://help.vc.systems/de/vc-map/v6.2/> (abgerufen 7. Jan. 2026).
Bildquelle: Virtual City Systems, Düsseldorf in 3D – Digitales Stadtmodell, <https://duesseldorf.virtualcitymap.de/public/#/> (abgerufen 7. Jan. 2026).

Good Practice II

Smart Region AUF

Kurzprofil

Die Verwaltungsgemeinschaft Fuchstal (Apfeldorf, Unterdießen und Fuchstal (AUF)) bietet mit dem (1) Digitalen Zwilling Smart Region AUF ein fotorealistisches 3D-Modell der Region, welches den Fokus des Energiemanagements mit anderen Schwerpunkten der ländlichen Raumentwicklung verbindet. Der Zwilling gibt über verschiedene Nutzungsoberflächen Informationen zu bspw. den Wärmeverlusten von Dachflächen und ökologisch wertvollen Arealen. Dabei wird sowohl der Bestand dargestellt sowie Zukunftsszenarien für die Nutzenden veranschaulicht. In diesen soll zukünftig das in der Umsetzung befindliche (2) Digitale Kraftwerk (Virtual Power Plant) als Teil des TwinBy Projekts integriert werden.



Typ des Zwillings	(1) Digitaler Zwilling, regionales 3D-Modell / (2) Virtual Power Plant
Räumliche Ebene	Gesamt-Stadt/Gemeindegebiet (Verwaltungsgemeinschaft Fuchstal)
Datenbasis	(1) Umgebungsdaten (DOP und bDOM): Bayerische Vermessungsverwaltung, Luftbildbefliegung RealityMaps / Bestandsdaten aus Projekt „Energiezukunft Fuchstal“, Betriebs- und Marktdaten

Zweck & Hauptfunktionen

- **Fotorealistischer Regional Viewer:** Die räumliche Basis bildet die Smart Region AUF als 3D-Modell, inklusive Gebäude, Gelände und Infrastruktur. Er ist die gemeinsame räumliche Grundlage für Planung, Analysen und Kommunikation in der Verwaltungsgemeinschaft.
- **Energiesystem & erneuerbare Energien:** Der Zwilling bildet Anlagen erneuerbarer Energien in der Region ab und baut eine Verbindung auf. Dies wird unterstrichen durch eine virtuelle Tour, die das lokale Energiesystem veranschaulicht, die Planung des nachhaltigen Energiekonzepts unterstützt und damit die Brücke zum Virtuellen Kraftwerk baut.
- **Solarkataster & Dachwärmeverluste:** Für sowohl öffentliche als auch private Gebäude werden die Solarpotenziale sowie Wärmeverluste der Dachflächen dargestellt. Damit wird eine sinnvolle Investition in Photovoltaik befördert.
- **Natur-, Klima- & Umweltinformationen:** Durch die Abbildung ökologischer Bestandteile und Flächen werden Klimaschutz- und Anpassungsstrategien unterstützt.
- **Transparente Dorfentwicklung:** Planungsvarianten lassen sich bildlich darstellen und stärken damit die Transparenz und den Bürger:innendialog frühzeitig.

Governance & Betrieb

- Auftraggeber: Stabsstelle Smart Region AUF (Gemeinde Fuchstal)
- Technische Umsetzung: (1) 3D RealityMaps GmbH, (2) Entelios AG (Konsortium beteiligt)

Warum ist es ein Highlight?

- **Ländlicher Raum:** Der Zwilling ist ein herausragendes Beispiel für die Umsetzung von Digitalisierung außerhalb der urbanen Umgebung und zur flächendeckenden Vernetzung.
- **Integrativer Ansatz:** Durch das Entwickeln verschiedener Anwendungen, welche in den Basiszwillings integriert werden, entsteht ein umfassendes und einsatzstarkes Gesamttool.
- **Regionale Vernetzung:** Als Teilprojekt der bayerischen Initiative TwinBy wird Vernetzung, Partnerschaft und Öffentlichkeitswirkung verbunden.

Quellen: RealityMaps / 3D RealityMaps GmbH, *SmartCity Fuchstal – digitaler Zwilling*, <https://smartcity.realitymaps.de/Fuchstal/> (abgerufen 7. Jan. 2026). <https://smartcity.realitymaps.de/Fuchstal/>
 Bildquelle: RealityMaps / 3D RealityMaps GmbH, *SmartCity Fuchstal – digitaler Zwilling*, <https://smartcity.realitymaps.de/Fuchstal/> (abgerufen 7. Jan. 2026). <https://smartcity.realitymaps.de/Fuchstal/>

4.2 Befunde zur Funktionslogik digitaler Zwillinge

Ausgehend von der Forschungsfrage „Welche funktionalen Schwerpunkte dominieren bestehende digitale Zwillinge, und inwiefern entsprechen diese den Anforderungen von Regionen im Strukturwandel?“ zeigt die Analyse der digitalen Zwillinge ein deutliches Muster: Die meisten Zwillinge konzentrieren sich auf räumliche, datenbasierte Basisfunktionen, während strategisch-transformative Funktionen bislang nur vereinzelt vorkommen. Fast alle Projekte folgen einer ähnlichen Grundlogik aus Geobasisdaten, fachspezifischen Datenquellen und einer visuellen Nutzer:innenschnittstelle, unterscheiden sich jedoch stark darin, wie weit diese Grundlogik für politische Steuerung weiterentwickelt wird. Dabei lassen sich drei funktionale Schwerpunkte identifizieren, die unterschiedliche Reifegrade und Potenziale für die Unterstützung regionaler Transformationsprozesse aufweisen: (1) Monitoring & Visualisierung, (2) Analytik & Bewertung, und (3) Simulation & Szenarien.

Monitoring & Visualisierung – die dominierende Funktionslogik: Der überwiegende Teil der digitalen Zwillinge dient dazu, räumliche Strukturen und Zustände sichtbar zu machen. Typische Beispiele sind Düsseldorf in 3D, das Stadtstrukturen, Klima- und Gebäudeinformationen integriert, oder Bremen 3D, das Solarpotenziale, Bäume und Gebäudedaten in einer 3D-Umgebung darstellt. Diese Zwillinge schaffen Transparenz und unterstützen verständliche Kommunikation – ein entscheidender, aber eher grundlegender Baustein für den Strukturwandel.

- Zentrale Funktion: Sichtbarmachung komplexer räumlicher Daten (3D-Modelle, Live-Daten, thematische Karten)

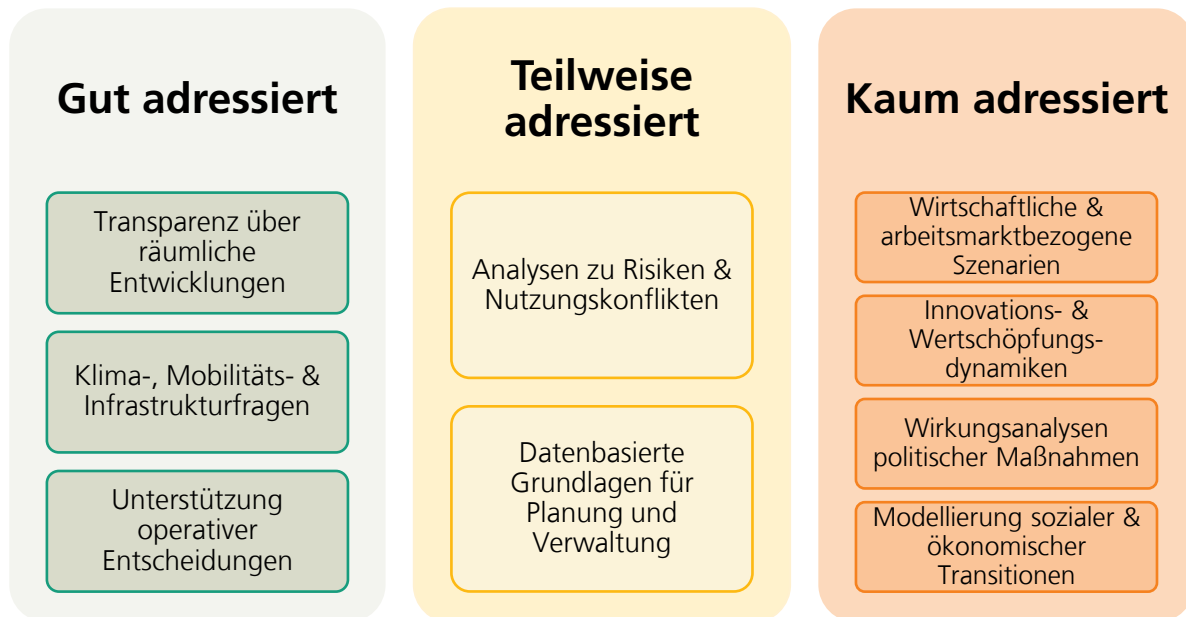
Analytik & Bewertung – wichtige, aber oft bereichsbezogene Vertiefungen: Rund die Hälfte der Projekte erweitert die Visualisierung um analytische Module, z. B. zur Einschätzung von Risiken oder Flächenpotenzialen. Beispiele sind Aschaffenburg (Klimadashboard) mit mikroklimatischen Bewertungsfunktionen oder Kulmbach, wo Wärme-, Solar- und Krisenszenarien analysiert werden. Diese Funktionen liefern wertvolle Entscheidungsgrundlagen zu Klimaresilienz, Mobilität oder Energie – adressieren allerdings nur einzelne Transformationsdimensionen.

- Zentrale Funktion: Bewertung von Risiken, Potenzialen und Wechselwirkungen (z. B. Flächen, Klima, Mobilität)

Simulation & Szenarien – selten, aber entscheidend für strategische Steuerung: Nur wenige Zwillinge enthalten echte Vorhersage- oder Simulationsmodelle, obwohl diese für strukturwandelnde Regionen besonders relevant wären. Beispiele sind Deggendorf-Plattling mit Starkregensimulationen oder Schwabach GUZI, wo Extremwetter Szenarien modelliert werden. Solche Zwillinge ermöglichen proaktive statt reaktiver Politik – sind aber bisher die Ausnahme.

- Zentrale Funktion: Modellierung zukünftiger Entwicklungen (z. B. Wasser, Klima, Verkehr)

Bezüglich des zweiten Teils der Forschungsfrage – inwieweit diese Funktionslogiken den Anforderungen von Regionen im Strukturwandel entsprechen – wird deutlich, dass die meisten existierenden Zwillinge wichtige Grundlagenanforderungen erfüllen, aber zentrale strategische Steuerungsbedarfe von Strukturwandelregionen bislang kaum abdecken (vgl. Abbildung 1). Damit unterstützen die aktuellen Anwendungen vor allem operative Aufgaben und schaffen Transparenz, ohne jedoch die komplexen wirtschaftlichen, sozialen und innovationsbezogenen Dynamiken eines Strukturwandels abzubilden. Für die Landes- und Regionalpolitik bedeutet dies, dass das Potenzial digitaler Zwillinge für strategische Zukunftsentscheidungen noch weitgehend ungenutzt bleibt – insbesondere dort, wo Szenarien, politische Wirkungsanalysen oder Wertschöpfungsentwicklungen erforderlich wären.

Abbildung 1: Abdeckung zentraler Funktionsbedarfe durch bestehende Anwendungen

4.3 Befunde zu Daten- und Modellierungsmodellen digitaler Zwillinge

Um die Forschungsfrage „Welche Datenquellen und Modellierungsansätze nutzen bestehende Zwillinge, und welche Daten fehlen, um regionale Transformationsprozesse systemisch abzubilden?“ zu beantworten, wird deutlich, dass die Leistungsfähigkeit der Anwendungen stark davon abhängt, welche Datenarten sie einbeziehen und wie diese modelliert werden. Die Analyse offenbart dabei ein klares Muster zwischen den heute genutzten Daten, den technisch realisierbaren Modellierungsansätzen und denjenigen Informationen, die für eine strategische Transformationssteuerung eigentlich notwendig wären. Dabei lassen sich drei zentrale Dimensionen identifizieren: (1) die aktuell genutzten Datenquellen mit deutlicher Dominanz räumlicher und technischer Daten, (2) die angewandten Modellierungsansätze mit Schwerpunkt auf Monitoring statt Simulation, sowie (3) die fehlenden Daten, die zentrale Lücken für Transformationsregionen aufweisen.

Dominanz räumlicher und technischer Daten: Fast alle Zwillinge greifen auf Geobasisdaten als strukturelles Fundament zurück (3D-Stadtmodelle, Geländemodelle, Orthofotos, Katasterdaten). Beispiele dafür sind Düsseldorf in 3D, Bremen 3D, oder der Digitale Zwilling Sachsen (GeoSN). Daneben findet sich eine breite Nutzung thematischer Fachdaten, je nach Use Case:

- Umwelt- und Klimadaten: Starkregen- und Wetterdaten (Deggendorf-Plattling, Dresden), Hitzesensorik (Schwabach GUZI), Mikroklima (Aschaffenburg)
- Mobilitäts- und Verkehrsdaten: Floating Car Data (Forchheim), Bodenradardaten (TWIN4ROAD), Kameradaten (Schwandorf)
- Energiedaten: Energieverbräuche und Wärmeverluste (Fuchstal, Isen), Solarpotenziale (Bremen 3D)
- Infrastrukturdaten: Abwassernetzmodelle (Deggendorf-Plattling), Bebauungs- und Flächennutzungspläne (Halle, TwinCity3D)
- Verwaltungsdaten: Einwohnermeldedaten (Schwabach), Krankenhausbelegungsdaten (Aschaffenburg-Alzenau), städtische Grünflächenkataster (Halle)

Diese Datenbasis erlaubt in vielen Fällen eine präzise Abbildung räumlicher Prozesse, bleibt aber überwiegend technisch und kommunal-infrastrukturell orientiert.

Schwerpunkt auf Monitoring statt Simulation:

Die meisten Zwillinge arbeiten mit deskriptiven Modellen, die Daten visualisieren oder Zusammenhänge darstellen, jedoch keine umfassenden Zukunftsszenarien erzeugen. Nur wenige Projekte nutzen simulative Modelle, wie z. B.:

- Starkregensimulationen (Deggendorf-Plattling, Dresden)
- Extremwitterszenarien (Schwabach)
- Echtzeit-Klima- oder Verkehrsdynamiken (Wuppertal, Düsseldorf in 3D)

Diese Modellierungen sind jedoch thematisch eng fokussiert und betreffen überwiegend Umwelt- und Infrastrukturszenarien. Sozioökonomische Modellierungen – etwa zur Wirtschaftsentwicklung, Arbeitsmarkt, demografischen Veränderungen oder zum Innovationsgeschehen – kommen in keinem der betrachteten digitalen Zwillinge vor.

Zentrale Lücken für Transformationsregionen: Aus der Analyse wird deutlich, dass kritische Daten für den Strukturwandel nahezu vollständig fehlen, darunter:

- Wertschöpfungs- und Unternehmensdaten
- Arbeitsmarkt- und Fachkräftedaten
- Daten zu Innovationsaktivitäten, Technologien oder Branchenentwicklungen
- Soziale Daten (Lebensqualität, Migrations- und Mobilitätsverhalten, Teilhabe)
- Makroökonomische oder regionale Entwicklungsindikatoren
- Daten zur Betroffenheit regionaler Ökonomien durch Strukturwandel (z. B. Dekarbonisierung, Digitalisierung, Demographie)

Damit bilden bestehende digitale Zwillinge vor allem den räumlich-technischen Zustand einer Kommune oder Region ab – nicht jedoch die ökonomischen und sozialen Transformationsprozesse, die für politische Steuerung zentral wären. Bezüglich des zweiten Teils der Forschungsfrage wird somit deutlich, dass genau diese für Strukturwandel entscheidenden sozioökonomischen Dimensionen systematisch ausgeblendet bleiben.

Digitale Abbilder in ihren unterschiedlichen Ausprägungen könnten somit im Strukturwandel eine realistische Lösungsperspektive bieten, weisen aber auch spezifische Grenzen auf. In Regionen, die keine Echtzeit-Sensordaten, großen Datenplattformen oder komplexen Modellierungen bereitstellen können, bieten statistische Zwillinge einen realistischen Einstieg: Sie arbeiten mit verfügbaren Sekundärstatistiken, strukturieren Daten systematisch und ermöglichen erste Szenario- und Vergleichsanalysen, ohne dass eine umfassende digitale Infrastruktur aufgebaut werden muss. Ihr Vorteil: Sie können wirtschaftliche, soziale und demografische Entwicklungen abbilden – Bereiche, die in den meisten digitalen Zwillingen fehlen. Ihre Grenzen: Sie sind meist nicht echtzeitfähig, bilden komplexe Systeme oft nur vereinfacht ab. Für Strukturwandelregionen ergibt sich daraus, dass eine hybrider Zwilling mit der Kombination aus räumlichen digitalen Daten und statistischen Systemmodellen perspektivisch deutlich wirksamer ist als der alleinige Fokus auf geodatenbasierte Ansätze.

5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für den Strukturwandel

Die Ergebnisse dieses Impulspapiers zeigen im Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage „Wie können digitale Zwillinge politische Entscheidungsträger:innen bei der Steuerung regionaler Strukturwandelprozesse unterstützen?“, dass digitale Zwillinge grundsätzlich wichtige Voraussetzungen erfüllen, die für transparente und datenbasierte Steuerung notwendig sind – ihre aktuelle Ausgestaltung jedoch noch deutlich hinter den Anforderungen von Transformationsregionen zurückbleibt.

Aus der Analyse der Literatur wird klar, dass Zwillinge mehr sind als Geobasisdaten: Sie können als integrierte Dateninfrastrukturen dienen, die räumliche, technische und thematische Informationen bündeln und komplexe Zusammenhänge sichtbar machen. Für Regionen im Strukturwandel sind genau solche Instrumente notwendig, um Transparenz, Evidenz und nachvollziehbare Entscheidungsprozesse zu stärken.

Die empirische Analyse von 60 Anwendungen bestätigt dieses Potenzial, zeigt aber zugleich klare Grenzen. Drei Funktionslogiken dominieren: Monitoring & Visualisierung, Analytik & Bewertung und – deutlich seltener – Simulation & Szenarien. Während räumlich-technische Fragestellungen umfassend abgebildet werden, fehlen Daten und Modelle zu wirtschaftlichen, sozialen oder innovationsbezogenen Dynamiken fast vollständig.

Die wichtigsten Erkenntnisse

1. Digitale Zwillinge sind heute vor allem räumlich-technische Werkzeuge

- Sie visualisieren Klima, Infrastruktur, Mobilität, Energie und Flächen, aber kaum wirtschaftliche oder soziale Dynamiken.
- Der Großteil der Projekte bietet Monitoring- und Analysefunktionen; nur wenige liefern Simulationen oder Zukunftsszenarien.

2. Strategische Steuerungsbedarfe des Strukturwandels werden kaum abgedeckt

- Es fehlen sozioökonomische Daten zu Innovation, Wirtschaft, Wertschöpfung, Bevölkerung und Fachkräften.
- Dadurch können Zwillinge wirtschafts- und sozialpolitische Maßnahmen noch nicht systemisch abbilden oder deren Wirkungen simulieren.

3. Regionen brauchen hybride Modelle, nicht nur Geobasiszwillinge

- Räumliche Daten allein reichen nicht aus, um den komplexen Herausforderungen im Strukturwandel zu begegnen.
- Statistische Zwillinge können ökonomische und gesellschaftliche Entwicklungen modellieren und ergänzen digitale Zwillinge sinnvoll.

4. Transparenz ist ein zentraler Wirkmechanismus

- Zwillinge ermöglichen nachvollziehbare Entscheidungsprozesse und stärken Vertrauen, welches ein zentraler Bedarf in Strukturwandelprozessen ist.

5. Lokale Bedarfe bestimmen den Erfolg

- Zwillinge wirken besonders gut, wenn sie praxisnah und (kommunal-)spezifisch aufgebaut werden.

Damit wird deutlich: Zwillinge leisten heute einen wichtigen Beitrag zur Abbildung räumlicher und infrastruktureller Entwicklungen, decken aber zentrale strategische Steuerungsbedarfe des Strukturwandels noch nicht ab.

Praktische Implikationen: Relevanz für Politik und regionale Akteure: Für politische Entscheidungsträger:innen eröffnet dies wichtige Potenziale: Digitale Zwillinge schaffen Transparenz über räumliche Entwicklungen, unterstützen evidenzbasierte Entscheidungen und ermöglichen eine nachvollziehbare Begründung strukturpolitischer Maßnahmen. Sie tragen dazu bei, Förderentscheidungen, Investitionen und Infrastrukturmaßnahmen datenbasiert zu prüfen und deren Wirkungen besser zu verstehen. Auch für Verwaltungen, Wirtschaftsförderungen und Unternehmen ergibt sich ein Mehrwert: Durch die Integration heterogener Datenquellen entsteht eine Infrastruktur, die Planungsprozesse erleichtert, sektorale Fachinformationen bündelt und eine systematische Analyse komplexer Wirkungszusammenhänge erlaubt. Beispiele wie die LEAD-Projekte verdeutlichen, dass Zwillinge besonders wirksam sind, wenn sie spezifische lokale Bedarfe adressieren – etwa in den Bereichen Klimaanpassung, Mobilität oder Krisenmanagement.

Empfehlungen für Politik und regionale Akteure

1. Zwillinge nicht als rein technische Projekte verstehen, sondern als Governance-Werkzeuge

- Zwillinge sollten Datenintegration, Transparenz und politische Entscheidungsprozesse unterstützen und nicht nur Visualisierungsinstrumente liefern.

2. Aufbau hybrider Zwillinge fördern (Digitaler & Statistischer Zwilling)

- Räumliche und sozioökonomische Daten sollten verbunden werden, um Entwicklungspfade, Maßnahmenwirkungen und Zielkonflikte darzustellen.

3. Standards für Datenintegration und Interoperabilität setzen

- Landes- oder Bundesrichtlinien helfen, Doppelstrukturen zu vermeiden und Skalierbarkeit zu ermöglichen.

4. Szenariotechnik als zentrale Funktion stärken

- Strukturwandel braucht ex ante-Analysen, Zukunftsszenarien und Wirkungssimulationen – hier müssen Zwillinge gezielt weiterentwickelt werden.

5. Kompetenzaufbau in Verwaltungen sichern

- Regionen benötigen Datenkompetenz, Modellierungswissen und personelle Kapazitäten, nicht nur neue Software.

6. Regionale Wissensbestände aktiv integrieren

- Zwillinge sollten lokale Perspektiven, Verwaltungsdaten und fachliche Expertise bündeln (Planer, Unternehmen, Zivilgesellschaft).

7. Nutzung für Beteiligung und Transparenz ausbauen

- Offene Dashboards, verständliche Visualisierungen und Szenarien erhöhen Legitimität politischer Entscheidungen.

8. Pilotregionen und Leuchtturmprojekte gezielt fördern

- Die systematische Förderung kommunaler Zwillinge schafft messbare Lernkurven und schnellere Skalierung.

9. Relevante sozioökonomische Daten systematisch verfügbar machen

- Ohne Daten zu Innovation, Arbeitsmarkt, Unternehmen und Demografie können Zwillinge Strukturwandel nicht abbilden oder unterstützen.

10. Klärung der Governance-Fragen: Verantwortung, Pflege, Finanzierung

- Zwillinge brauchen langfristige institutionelle und finanzielle Verankerung – sonst zerfallen sie nach Projektende.

Theoretische Beiträge: Weiterentwicklung des Begriffs und methodische Implikationen: Wissenschaftlich trägt dieser Beitrag dazu bei, das Verständnis Digitaler Zwillinge im Kontext regionaler Transformation zu präzisieren. Die Ergebnisse zeigen, dass digitale Zwillinge zwar zentrale räumliche und technische Prozesse abbilden, jedoch nur begrenzt geeignet sind, ökonomische oder gesellschaftliche Transformationsdynamiken zu erfassen. Für diese Zwecke bietet das Konzept des statistischen Zwillings eine ergänzende Perspektive, da es auf der Integration und Modellierung regionalstatistischer Daten basiert und damit längerfristige Struktur-, Wirtschafts- oder Innovationsentwicklungen abbilden kann. Damit wird deutlich, dass Steuerungsinstrumente für den Strukturwandel mehr als einen Geobasiszwilling benötigen: Es braucht hybride Zwillinge, die räumliche, technische und sozioökonomische Daten zusammenführen und systemisch interpretieren können.

Offene Fragen für Entwicklungsbedarfe und Governance-Herausforderungen: Trotz der identifizierten Potenziale bleiben zentrale Fragen offen:

1. Wie können eine langfristige Datenintegration und Modellpflege organisatorisch und finanziell gesichert werden?
2. Welche Kompetenzen benötigen Verwaltungen für den Umgang mit digitalen Zwillingen?
3. Wie können interoperable, skalierbare Anwendungen gestaltet werden?
4. Wie ist die Legitimität digital gestützter Entscheidungsprozesse zu bewerten?

Zwar können digitale Zwillinge Transparenz und Nachvollziehbarkeit erhöhen, doch entstehen neue Risiken – etwa durch unvollständige Daten, Verzerrungen oder die Gefahr, dass algorithmische Verfahren politische Bewertungsspielräume verdrängen. Entscheidend wird daher sein, digitale Zwillinge nicht nur technisch weiterzuentwickeln, sondern sie in Governance-Prozesse einzubetten, die Beteiligung, Rechenschaft und klare Verantwortlichkeiten sicherstellen.

Zusammenfassend besitzen Digitale Zwillinge das Potenzial, zu zentralen Infrastrukturbausteinen moderner Regionalentwicklung zu werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass sie als integrierte, multidimensionale Systeme verstanden und weiterentwickelt werden, die technische, räumliche und sozioökonomische Daten gleichermaßen abbilden. Nur dann können sie dazu beitragen, Transformationsprozesse transparenter, strategischer und wirksamer zu gestalten.

6 Literatur

- Abdelrahman, M.; Macatulad, E.; Lei, B.; Quintana, M.; Miller, C.; Biljecki, F. (2025): What is a Digital Twin anyway? Deriving the definition for the built environment from over 15,000 scientific publications. In: *Building and Environment*, (274), S. 112748. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112748>.
- Bandara, D.; Ranadewa, K.; Parameswaran, A.; Eranga, B.; Nawarathna, A. (2023): Lean Iceberg Model to minimise barriers for Digital Twin Implementation: Sri Lankan construction industry perspective. In: *World Construction Symposium*, 1. <https://doi.org/10.31705/WCS.2023.55>.
- Baron, D.; Bartl, W. (2024): The Coal Phase-Out in Germany and Its Regional Impact on Economic Worries. In: *Social Sciences*, 13 (7), S. 339. <https://doi.org/10.3390/socsci13070339>.
- Biddau, F.; Rizzoli, V.; Cottone, P.; Sarrica, M. (2024): "These industries have polluted consciences; we are unable to envision change": Sense of place and lock-in mechanisms in Sulcis coal and carbon-intensive region, Italy. In: *Global Environmental Change*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102850>.
- Bouchard, P.; Voß, S.; Heilig, L.; Shi, X. (2023): A Case Study on Smart Grid Technologies with Renewable Energy for Central Parts of Hamburg. In: *Sustainability*, 15 (22), S. 15834. <https://doi.org/10.3390/su152215834>.
- Bundeszentrale für politische Bildung (Hrsg.) (2020). *Strukturwandel als Gelegenheit für die Lausitz. Warum dem Anfang noch der Zauber fehlt*. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/304334/strukturwandel-als-gelegenheit-fuer-die-lausitz/>.
- Capano, G.; Pritoni, A. (2020): Policy Cycle. In: *The Palgrave Encyclopedia of Interest Groups, Lobbying and Public Affairs*, S. 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13895-0_69-1.
- Cardamone, M.; Cimino, A.; Longo, F.; Manfredi, K. A.; Mirabelli, G.; Padovano, A.; Sammarco, C.; Solina, V. (2024): Empowering operators with a human-in-the-loop/on-the-loop simulation-based digital twin: the case of a smart learning factory. In: *Proceedings of the Summer School Francesco Turco*.
- Charalabidis, Y.; Kontos, G.; Zitianellis, D. (2025): Local Digital Twins for Cities and Regions: The Way Forward. In: Raes, L.; Ruston McAleer, S.; Croket, I.; Kogut, P.; Brynskov, M.; Lefever, S. (Hrsg.): *Decide Better*. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 233–259. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81451-8_9.
- Dalibor, M.; Jansen, N.; Rumpe, B.; Schmalzing, D.; Wachtmeister, L.; Wimmer, M.; Wortmann, A. (2022): A Cross-Domain Systematic Mapping Study on Software Engineering for Digital Twins. In: *Journal of Systems and Software*, 193, S. 111361. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111361>.
- Deutscher Bundestag und Bundesrat (Hrsg.) (2020): *Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen*.
- Ellul, C.; Stoter, J.; Bucher, B.; Olsson, P.-O.; Billen, R.; Delathouwer, B. (2024): Towards National Connected Digital Twins - A Geospatial Perspective (*ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*), S. 147–154. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W5-2024-147-2024>.
- Eriksson, K.; Markussen, C. (2023): Quality Assurance of Digital Twins. In: *Volume 1: Offshore Technology (42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering)*, 6/11/2023 - 6/16/2023, Melbourne, Australia. <https://doi.org/10.1115/OMAE2023-105285>.
- Garske, B.; Holz, W.; Ekardt, F. (2024): Digital twins in sustainable transition: exploring the role of EU data governance. In: *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 9, S. 1303024. <https://doi.org/10.3389/frma.2024.1303024>.

- Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 1(2014), 1–7.
- Grillitsch, M.; Asheim, B. (2018): Place-based innovation policy for industrial diversification in regions. In: *European Planning Studies*, 26 (8), S. 1638–1662. <https://doi.org/10.1080/09654313.2018.1484892>.
- Grimmelikhuijsen, S.; Porumbescu, G.; Hong, B.; Im, T. (2013): The Effect of Transparency on Trust in Government: A Cross-National Comparative Experiment. In: *Public Administration Review*, 73 (4), S. 575–586. <https://doi.org/10.1111/puar.12047>.
- Hansen, O. H.; Jaiswal, V. (2023): A Framework for Trustworthy Digital Twins Over their Lifecycle. In: *Offshore Technology Conference Brasil (Offshore Technology Conference Brasil)*, 10/24/2023 - 10/26/2023, Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.4043/32851-MS>.
- Herpich, P.; Semb, J.; Oei, P.-Y.; Kemfert, C. (2024): Tagebauverläufe in der Lausitz zur Einhaltung der 1,5°-Grenze. Studie der FossilExit-Forschungsgruppe.
- Höchtel, J.; Parycek, P.; Schöllhammer, R. (2016): Big data in the policy cycle: Policy decision making in the digital era. In: *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 26 (1-2), S. 147–169. <https://doi.org/10.1080/10919392.2015.1125187>.
- IEC, 63278-1. (2023). IEC 63278-1:2023 Asset Administration Shell for industrial applications - Part 1: Asset Administration Shell structure.
- ISO, 23247-1. (2021). ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing.
- Juarez, M. G. J.; Giret, A.; Botti, V. (2025): Semantic and modular orchestration of AI-driven digital twins for industrial interoperability and optimization. In: *Journal of Industrial Information Integration*, 48, S. 100959. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100959>.
- Jürgens, E. (2025): Deficit Aversion as a Path to Higher Debt: Sovereign Debt Dynamics in a Stock-Flow Consistent Model with Public Capital. In: *Review of Political Economy*, S. 1–31. <https://doi.org/10.1080/09538259.2025.2544150>.
- Kim, S.; Heo, S. (2024): An agricultural digital twin for mandarins demonstrates the potential for individualized agriculture. In: *Nature Communications*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45725-x>.
- König, P. D.; Felfeli, J.; Achtziger, A.; Wenzelburger, G. (2024): The importance of effectiveness versus transparency and stakeholder involvement in citizens' perception of public sector algorithms. In: *Public Management Review*, 26 (4), S. 1061–1082. <https://doi.org/10.1080/14719037.2022.2144938>.
- Koschatzky, K. (2018): Innovation-based regional structural change – Theoretical reflections, empirical findings and political implications. Fraunhofer Institute for Systems.
- Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), S. 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- Krommyda, V.; Gourzis, K.; Gialis, S. (2024): Youth employment amid successive crises and the low-carbon transition: The case of Eurozone coal regions. In: *Environment and Planning E: Nature and Space*, 7 (4), S. 1620–1646. <https://doi.org/10.1177/25148486241250008>.
- Krüger, T.; Kraus, T.; Kaifie, A. (2022): A Changing Home: A Cross-Sectional Study on Environmental Degradation, Resettlement and Psychological Distress in a Western German Coal-Mining Region. In: *International journal of environmental research and public health*, 19 (12). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127143>.
- Lawitzky, C.; Weyh, A. (2020): Facetten des wirtschaftlichen Strukturwandels in Sachsen. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung.

- Liepert, C.; Stary, C.; Lamprecht, A.; Zügn, D. (2025): Digital Twin Data Provision Within Engineering: An AAS PLM Implementation Ensuring Interoperability. In: Elstermann, M.; Lederer, M. (Hrsg.): Subject-Oriented Business Process Management. Models for Designing Digital Transformations. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 3–23. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72041-3_1.
- Löw-Beer, D.; Luh, V. (2024): 'We are ignored rather than attacked politically'. Youth participation in regional sustainability transformation in eastern Germany. In: *Children's Geographies*, 22 (6), S. 898–915. <https://doi.org/10.1080/14733285.2024.2400164>.
- Masoumi, H.; Shirowzhan, S.; Eskandarpour, P.; Pettit, C. J. (2023): City digital twins: Their maturity level and differentiation from 3D city models. In: *Big Earth Data*, 7 (1), S. 1–36.
- Mishra, A.; El Barachi, M.; Kumar, M. (Hrsg.) (2024): Transforming Industry using Digital Twin Technology. Cham: Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-58523-4>.
- Mohamed, N.; Al-Jaroodi, J. (2025): On the Quality Aspects of Digital Twins. In: 2025 IEEE World AI IoT Congress (AlloT) (2025 IEEE World AI IoT Congress (AlloT)), S. 315–320. <https://doi.org/10.1109/AlloT65859.2025.11105328>.
- Möhring, M.; Keller, B.; Radowski, C.-F.; Blessmann, S.; Breimhorst, V.; Müthing, K. (2022): Empirical Insights into the Challenges of Implementing Digital Twins. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 310, S. 229–239. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3455-1_18.
- Morton, T.; Müller, K. (2016): Lusatia and the coal conundrum: The lived experience of the German Energiewende. In: *Energy Policy*, 99, S. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.024>
- Muñoz, P. (2022): How alike are my physical and digital twins? (Proceedings - ACM/IEEE 25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, MODELS 2022: Companion Proceedings), S. 201–204. <https://doi.org/10.1145/3550356.3552393>.
- Mureddu, F.; Paciaroni, A.; Pavelka, T.; Pemberton, A.; Remotti, L. A. (2025): Rights and responsibilities: Legal and ethical considerations in adopting local digital twin technology. In: *Decide Better: Open and Interoperable Local Digital Twins*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81451-8_11.
- Muringani, J.; Fitjar, R. D.; Rodríguez-Pose, A. (2024): Political trust and economic development in European regions. In: *The Annals of Regional Science*, 73 (4), S. 2059–2089. <https://doi.org/10.1007/s00168-024-01319-5>.
- Mutschler, M.; Mörtl, M.; Zimmermann, M. (2022): Challenges in Implementing Digital Twins – a Survey. In: Volume 2: 42nd Computers and Information in Engineering Conference (CIE) (ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference), 8/14/2022 - 8/17/2022, St. Louis, Missouri, USA. <https://doi.org/10.1115/DETC2022-88786>.
- Mythily, M.; David, B.; Vijay, J. A. (2024): Digital Twin Application in Various Sectors. In: Mishra, A.; El Barachi, M.; Kumar, M. (Hrsg.): Transforming Industry using Digital Twin Technology. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 219–237. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58523-4_11.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024): Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. Washington (DC). <https://doi.org/10.17226/26894>.
- Oei, P.-Y.; Hermann, H.; Herpich, P.; Holtemöller, O.; Lünenbürger, B.; Schult, C. (2020): Coal phase-out in Germany – Implications and policies for affected regions. In: *Energy*, 196, S. 117004. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117004>.
- OPC UA. (2008). OPC Unified Architecture.
- Palmer, C.; Hubbard, E.-M.; Grant, R.; Goh, Y. M. (2025): Personas to inform cognitive interaction with a Digital Twin. In: *Journal of Industrial Information Integration*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100893>.

- Pambudi, P. A.; Utomo, S. W.; Handoko, R. S. (2025): Coal Mining Reclamation: Lessons learned from tropical and subtropical countries. In: Journal of Environmental Science and Sustainable Development, 8 (1), S. 148–184. <https://doi.org/10.7454/jessd.v8i1.1299>.
- Pfeiffer, M.; Sonnberger, M. (2025): Rushing for the gold of the energy transition: An empirical exploration of the relevance of landownership for the wind energy expansion in Germany. In: Energy Research & Social Science, 123, S. 104030. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104030>.
- Pollermann, K. (2021): Regional Governance: Begriffe, Wirkungszusammenhänge und Evaluationsansätze. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- Pujari, S. K.; Saha, S. K. (2023): Barriers Hindering Digital Transformation in SMEs. In: Wang, J.; Dadwal, S.; Kumar, P.; Verma, R.; Singh, G. (Hrsg.): Drivers of SME Growth and Sustainability in Emerging Markets. IGI Global, S. 140–156. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0111-1.ch008>.
- Radtke, J.; Löw-Beer, D. (2024): Legitimizing sustainability transitions through stakeholder participation: Evaluating the Coal Commission in Germany. In: Energy Research and Social Science, 116. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103667>.
- Ricci, A.; Croatti, A.; Mariani, S.; Montagna, S.; Picone, M. (2022): Web of Digital Twins. In: ACM Transactions on Internet Technology, 22 (4), S. 1–30. <https://doi.org/10.1145/3507909>.
- Rodríguez-Pose, A. (2018). The revenge of the places that don't matter (and what to do about it). Cambridge journal of regions, economy and society, 11(1), 189-209.
- Rosa-Luxembur-Stiftung (Hrsg.) (2019): Nach der Kohle: Alternativen für einen Strukturwandel in der Lausitz. In: STUDIEN 4/2019, 1. Auflage.
- Sächsisches Oberbergamt: Gesetzgebung zum Kohleausstieg. Online verfügbar unter <https://www.oba.sachsen.de/kohleausstieg-4084.html>.
- Schubbe, N.; Boedecker, M.; Moshrefzadeh, M.; Dietrich, J.; Mohl, M.; Brink, M.; Reinecke, N.; Tegtmeyer, S.; Gras, P. (2023): Urbane Digitale Zwillinge als Baukastensystem: Ein Konzept aus dem Projekt Connected Urban Twins (CUT). In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 148. Jg. (Heft 1/2023), S. 14–23.
- Shafik, W. (2024): Chapter 3 - Digital twins tools and technologies. In: Sailesh, I.; Anand, N.; Anand, P.; Naved, M. (Hrsg.): Digital Twins for Smart Cities and Villages. Amsterdam: Elsevier, S. 55–80.
- Suganya, R.; Buhari, S. M.; Rajaram, S. (2022): Different Applications and Importance of Digital Twin. In: Vohra, M. (Hrsg.): Digital Twin Technology. Wiley, S. 189–203. <https://doi.org/10.1002/9781119842316.ch12>.
- Szumilas-Kowalczyk, H.; Giedych, R. (2022): Analysis of Regulatory Possibilities and Obstacles to Expand Renewable Energy and Preserve Landscape Quality in the Silesian Voivodship. In: Resources, 11 (2), S. 23. <https://doi.org/10.3390/resources11020023>.
- Temple, L.; Pereira, G. V.; Klausner, L. D. (2024): Unravelling the Use of Digital Twins to Assist Decision- and Policy-Making in Smart Cities. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.20916>.
- Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2022). *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen anstößt* | Der Klassiker der Verhaltensökonomie in Neuauflage. Ullstein Buchverlage.
- van Meerten, J.; Smit, K. (2024): The Impact of Digital Twin Technology on the Policy Lifecycle in Government Agencies and the Role of Value-Sensitive Design in Guiding its Ethical Development. In: Proceedings of the 2024 8th International Conference on Software and e-Business (ICSeB 2024: 2024 8th International Conference on Software and e-Business), 06 12 2024 08 12 2024, Osaka Japan. New York, NY, USA, S. 37–44. <https://doi.org/10.1145/3715885.3715891>.
- Viale Pereira, G.; Klausner, L. D.; Temple, L.; Lampoltshammer, T. (2023): "This (Smart) Town Ain't Big Enough": Smart Small Towns and Digital Twins for Sustainable Urban and Regional Development. In: Prosser, Alexander; Krimmer, Robert; Linden, Maria A.; Parycek, Peter; Tambouris, Efthimios; Kalampokis, Evangelos; Ojo, Adegboyega; Misuraca, Gianluca; van Noordt,

- Colin; Parycek, Peter (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Electronic Governance and Open Society: Challenges in Eurasia (EGOV-CeDEM-ePart 2023). Lugano, Schweiz.
- Wang, X. (2025): An Ethical Study of Digital Twin Urban Governance from the Perspective of New Quality Productivity. In: ICCREM 2024 (International Conference on Construction and Real Estate Management 2024), November 23–24, 2024, Guangzhou, China. Reston, VA, S. 1238–1245. <https://doi.org/10.1061/9780784485910.117>.
- Weber, V.; Ziemer, G. (Hrsg.) (2022): Die Digitale Stadt. Bielefeld, Germany: transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839464748>.
- Wiehe, J.; Haaren, C. von; Walter, A. (2020): How to achieve the climate targets? Spatial planning in the context of the German energy transition. In: Energy, Sustainability and Society, 10 (1). <https://doi.org/10.1186/s13705-020-0244-x>.
- Zikargae, M. H.; Woldearegay, A. G.; Skjerdal, T. (2022): Assessing the roles of stakeholders in community projects on environmental security and livelihood of impoverished rural society: A nongovernmental organization implementation strategy in focus. In: Heliyon, 8 (10), e10987. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10987>.



Hier geht es zur GENESIS Projektwebsite
<https://s.fhg.de/projekt-genesis>



Hier geht es zum GENESIS LinkedIn Kanal



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektbeschreibung GENESIS

Kern des Forschungsprojekts »Gestaltung neuer Entwicklungspfade im Strukturwandel in Sachsen (GENESIS)« ist die Entwicklung eines neuen Instruments zur Unterstützung technologieorientierter Transformation im Lausitzer und im Mitteldeutschen Revier. Das Instrument basiert auf einem datenbasierten Zwilling der vom Kohleausstieg betroffenen sächsischen Transformationsregionen. Durch intelligente Verknüpfung zahlreicher Datenquellen und Methoden werden Analysemodule entwickelt, die das Scouting erfolgsversprechender regionaler Entwicklungspfade, das Matching regionsinterner und -externer Kompetenzen, die Simulation der Wirkung von Förderentscheidungen und das Monitoring des Verlaufs des Strukturwandels ermöglichen. So können Entscheidungsträger: innen aus Politik und Industrie nachhaltige Entscheidungen treffen, die Wirkung von Transformationsmaßnahmen erhöhen und diese nachvollziehen.