

Bericht

**des Ausschusses für Forschung, Technologie, Raumfahrt
und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

Technikfolgenabschätzung (TA)

Potenziale des digitalen Zwillings für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses.....	3
Das Wichtigste in Kürze	7
1 Einleitung	9
2 Urbane digitale Zwillinge für eine klimaangepasste, nachhaltige Stadtentwicklung.....	12
2.1 Definition und Konzept	12
2.2 Datentypen und Datenquellen.....	14
2.3 Funktionalitäten, Visualisierungen und Einsatz von KI	16
2.4 Stand der Umsetzung.....	19
3 Potenziale und Anwendungsfelder urbaner digitaler Zwillinge.....	21
3.1 Nutzen- und Wirkungspotenziale	21
3.2 Beitrag zu Nachhaltigkeitszielen	23
3.3 Praxisbeispiele – Steckbriefe.....	26
4 Grenzen und Herausforderungen	31
4.1 Technische Machbarkeit.....	31
4.2 Interoperabilität unterschiedlicher technischer Systeme	32
4.3 Finanzielle Herausforderungen und mangelnder Nutzennachweis.....	34

	Seite
5 Gelingensbedingungen	35
5.1 Governancestrukturen.....	35
5.2 Finanzielle Rahmenbedingungen.....	37
5.3 Rechtliche Rahmenbedingungen	38
5.4 Ethische Grundsätze	40
6 Urbane digitale Zwillinge im Jahr 2035: drei Szenarien zur künftigen Verbreitung.....	42
6.1 Entwicklung der Szenarien.....	42
6.2 Szenario 1: Nachhaltige und an den Klimawandel angepasste Städte..	43
6.3 Szenario 2: Insellösungen und verpasste Chancen	45
6.4 Szenario 3: Reaktive Maßnahmen und zögerliche Umsetzung	47
7 Gestaltungsoptionen für urbane digitale Zwillinge	49
8 Literatur	53
9 Anhang.....	57
9.1 Interviewpartner/innen.....	57
9.2 Fokusgruppe: Teilnehmer/innen und Vorgehensweise.....	57
9.3 Abbildungen	59
9.4 Tabellen	59
9.5 Kästen.....	59

Vorwort des Ausschusses

Urbane digitale Zwillinge sind virtuelle, dynamisch aktualisierte Abbilder von Stadt- und Kommunalsystemen. Sie kombinieren Geobasisdaten mit bereichsspezifischen Fachinformationen, etwa zu Mobilität, Energie, Klima oder sozialer Infrastruktur, und integrieren dafür heterogene Daten aus öffentlichen und privaten Quellen.

In Deutschland existieren zwar bereits zahlreiche Pilot- und Forschungsprojekte für die Anwendung urbaner digitaler Zwillinge, allerdings bestehen noch regulatorische Lücken und Herausforderungen, etwa im Bereich der Skalierbarkeit von Hardware- und Netzwerkinfrastrukturen oder der dauerhaften Finanzierung von Betriebskosten urbaner digitaler Zwillinge.

Vor diesem Hintergrund initiierte der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (20. WP) eine TA-Kompakt-Studie zum Thema „Potenziale des digitalen Zwillings für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung“. Die Untersuchung wurde vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) durchgeführt, um eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die parlamentarische Meinungsbildung zu schaffen.

Der vorliegende Bericht bietet einen Überblick über die Potenziale und Risiken für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung mit urbanen digitalen Zwillingen sowie mögliche zukünftige Entwicklungspfade und technologische, organisatorische und politische Gestaltungsoptionen. Während urbane digitale Zwillinge ein wichtiges Instrument für die Stadtentwicklung sein können, zeichnet sich ab, dass zwar spezifische Zwillinge für Teilbereiche, wie etwa Verkehr, Wärmeplanung oder die Simulation von Klimaanpassungsmaßnahmen, entstehen, eine ganzheitliche Integration bislang jedoch noch nicht realisiert worden ist.

Auf Basis der in der TA-Kompakt-Studie gewonnenen Erkenntnisse wurden drei alternative Szenarien zum Entwicklungsstand urbaner digitaler Zwillinge im Jahr 2035 entworfen. Dabei zeigt sich, dass in Abhängigkeit von Schlüsselfaktoren, wie etwa den politischen Rahmenbedingungen und spezifischen Governancestrukturen, die Entwicklung von urbanen digitalen Zwillingen gestaltet werden kann, um vorhandene Potenziale zu heben.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht eine aktuelle und fundierte Informationsgrundlage zu einem Themenfeld, das für Forschungs- und Innovationspolitik, die Kommunalpolitik, die Baupolitik sowie die Umweltpolitik von strategischer Bedeutung ist.

Berlin, den 10. Juni 2026

Prof. Dr. Karl Lauterbach
Vorsitzender

Prof. Dr. Reza Asghari
Berichterstatte

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichterstatte

Oliver Kaczmarek
Berichterstatte

Dr. Andrea Lübcke
Berichterstatte

Sonja Lemke
Berichterstatte

Marlène de Saussure
Susann Sophie Bernhold
Tobias Hungerland
Sonja Kind

unter Mitarbeit von
Tim Gensheimer

**Potenziale des digitalen Zwillings für
eine nachhaltige und klimaangepasste
Stadtentwicklung**

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Grundlage ist ein Vertrag mit dem Deutschen Bundestag. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie dem Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Das Wichtigste in Kürze

Sechs Fragen – sechs Antworten

1. Was sind urbane digitale Zwillinge (UDZ) und welche technischen Voraussetzungen sind notwendig für UDZ?
 - UDZ werden als virtuelle, dynamisch aktualisierte Abbilder von Stadt- und Kommunalssystemen definiert, die Geobasisdaten und bereichsspezifische Fachinformationen modular kombinieren.
 - UDZ bieten deskriptive, diagnostische, prädiktive und simulationsbasierte Funktionen, visualisieren komplexe Zusammenhänge (2D-/3D-Karten, Dashboards, AR/VR) und nutzen künstliche Intelligenz (KI) für Mustererkennung, Prognosen und teilautonome Entscheidungen.
 - Der Aufbau von UDZ erfordert die Integration heterogener Daten (zu Geobasis, Mobilität, Energie, Klima, soziale Infrastruktur etc.) aus öffentlichen und privaten Quellen.
2. Welche Potenziale bieten UDZ für eine nachhaltige Stadtentwicklung?
 - UDZ können durch Emissionsreduktion, Ressourceneffizienz und transparente Bürgerbeteiligung ökologische, ökonomische und soziale Mehrwerte schaffen.
 - Durch die Verknüpfung von Daten- und Simulationstools können UDZ konkrete Beiträge zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele leisten, insbesondere zur Erreichung von Ziel 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden) und 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz), aber auch zur Erreichung weiterer ökologischer, sozialer und ökonomischer Ziele beitragen.
3. Was sind Hemmnisse für die Entwicklung von UDZ?
 - Die Skalierbarkeit und technische Leistungsfähigkeit von UDZ wird durch begrenzte Hardware- und Netzwerkinfrastruktur, anspruchsvolle Datenerfassung, -übertragung, -verarbeitung und -visualisierung sowie den hohen Ressourcen- und Energieverbrauch eingeschränkt.
 - Fragmentierte Datenquellen, unterschiedliche Datenformate und mangelnde Standards erschweren den Datenaustausch, die Integration und die bidirektionale Anbindung von UDZ.
 - Die hohen Anfangsinvestitionen sowie laufende Betriebs- und Folgekosten von UDZ, die Unsicherheit der langfristigen Finanzierung und bislang fehlende quantifizierte Nutzennachweise stellen vor allem kleinere Kommunen mit begrenzten Haushaltsmitteln vor finanzielle Herausforderungen.
4. Welche Rahmenbedingungen sind für die Entwicklung von UDZ förderlich?
 - Klare Governancestrukturen, insbesondere ein robustes Datengovernanceframework mit definierten Rollen, Verantwortlichkeiten und einer zentralen Koordinierungsstelle, sind unverzichtbar, um Datenqualität, Interoperabilität, rechtliche Vorgaben und die effektive Nutzung UDZ in kommunalen Prozessen zu gewährleisten.
 - Zwar existieren verschiedene Finanzierungsmodelle und Förderprogramme (öffentliche Subventionen, Public Private Partnerships, EU- und Bundesprogramme), aber die notwendige, langfristige Finanzierung für den Aufbau, Betrieb und die Weiterentwicklung von UDZ wird noch unzureichend unterstützt.
 - Es bedarf klarer und konsistenter rechtlicher Rahmenbedingungen für UDZ, darunter Datenschutz- und Sicherheitsvorgaben, Haftungs- und Genehmigungsregelungen sowie verbindliche Standards und Interoperabilitätsanforderungen.
 - Ethische Grundsätze, wie etwa Nichtdiskriminierung, barrierefreie Zugänglichkeit, transparente Entscheidungsprozesse, verantwortungsbewusster Umgang mit Daten und die Vermeidung von Bias, müssen beachtet werden, um soziale Gerechtigkeit und Vertrauen zu sichern.
5. Wie können künftige Entwicklungspfade für UDZ aussehen?
 - Durch eine systematische Analyse von 37 Einflussfaktoren und auf Basis einer Wechselwirkungsanalyse wurden im vorliegenden TA-Kompakt drei plausible Szenarien für das Jahr 2035 entworfen.
 - Szenario 1 schildert eine mögliche zukünftige Entwicklung, in der UDZ flächendeckend in allen Kommunen verankert und gesetzlich vorgeschrieben sind sowie finanziell unterstützt werden, sodass daten- und KI-gestützte Planungsprozesse umfassende Klimaanpassungs- und Nachhaltigkeitsmaßnahmen ermöglichen und zugleich aktiv Bürgerbeteiligung sowie offene Datenökosysteme fördern.

- Szenario 2 skizziert eine mögliche Entwicklung, in der UDZ nur sporadisch und fragmentiert in einzelnen Städten eingesetzt werden, finanzielle und institutionelle Hürden zu unzureichender Skalierung führen und dadurch viele Chancen für wirksame Klimaanpassung und nachhaltige Stadtentwicklung verpasst bleiben.
 - Szenario 3 beschreibt schließlich eine mögliche Entwicklung, in der UDZ kaum über einzelne Pilotprojekte hinaus genutzt werden, weil fehlende Finanzierung, schwacher politischer Wille und mangelnde Integration zu einer reaktiven, fragmentierten Stadtentwicklung führen, bei der Klimarisiken nur punktuell und ohne langfristige, datengestützte Maßnahmen adressiert werden.
6. Welche Gestaltungsoptionen lassen sich ableiten und welcher Forschungsbedarf besteht weiterhin?
- Um UDZ flächendeckend und wirkungsvoll für eine klimaangepasste und nachhaltige Stadtentwicklung einsetzen zu können, sollten verschiedene technische, organisatorische und politische Gestaltungsoptionen miteinander verknüpft werden. Dazu gehören beispielsweise die Schaffung einer standardisierten Systemarchitektur, der Ausbau von IoT-Sensornetzwerken und skalierbaren Recheninfrastrukturen, die Umsetzung nutzungsfreundlicher Bedienschnittstellen, Einhaltung einer klaren Datengovernance, Etablierung nachhaltiger Finanzierungsmodelle, Schaffung eines verbindlichen Rechtsrahmens und die Gestaltung, orientiert an ethischen Leitlinien.
 - Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich robuster Mess- und Bewertungsmetriken, mit denen der tatsächliche Mehrwert, die Kosteneffizienz, die gesellschaftlichen Auswirkungen und die langfristige Wirksamkeit von UDZ-basierten Maßnahmen quantifiziert und deren Integration in Verwaltungs- und Planungsprozesse systematisch untersucht werden.

1 Einleitung

- Der Anteil der Stadtbevölkerung wächst weiter, wodurch Kommunen zunehmend vor komplexen Herausforderungen wie Klimawandel, Ressourcenknappheit, Infrastrukturbelastung sowie sozialer Transformation stehen und nachhaltige Lösungen für Planung, Steuerung und Resilienz entwickeln müssen.
- Urbane digitale Zwillinge (UDZ) können dabei als datenbasierte Entscheidungs- und Planungsunterstützung dienen, indem sie unterschiedliche Datenquellen integrieren, Wechselwirkungen sichtbar machen und so eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung fördern.

Immer mehr Menschen leben in Städten: In Deutschland lag der Anteil der Stadtbevölkerung 2024 bei rund 78 %, weltweit bei etwa 58 % (Statista 2025). Prognosen zufolge wird sich dieser Trend weiter verstärken. In 10 Jahren sollen über 80 % der deutschen Bevölkerung in Städten wohnen (Statista 2025, S. 21). Städte werden damit auch künftig der zentrale Lebens- und Handlungsraum für einen Großteil der Bevölkerung sein.

Mit der zunehmenden Urbanisierung gehen für deutsche Kommunen erhebliche Herausforderungen einher. Neben dem wachsenden Druck auf Flächen, Infrastrukturen und Dienstleistungen sind sie verstärkt gefordert, auf übergeordnete Entwicklungen, wie den Klimawandel, demografischen Wandel und die zunehmende Ressourcenknappheit, zu reagieren. Hinzu kommen spezifische lokale Fragestellungen, etwa in den Bereichen Mobilität, Energie- und Infrastrukturmanagement. Von besonderer Bedeutung sind zudem die Stärkung der Resilienz gegenüber Wetterextremen sowie der Katastrophenschutz (DIN 2024, S. 9; TAB 2023, S. 18 ff.). Lösungen sind insofern nicht nur für die Funktionsfähigkeit städtischer Systeme gefragt. Sie müssen zunehmend auch den Anspruch an eine nachhaltige Stadtentwicklung erfüllen und dabei ökologische, soziale und ökonomische Zielsetzungen integrieren.

Generell sind Kommunen hochkomplexe Systeme, in denen vielfältige Infrastrukturen und öffentliche Dienstleistungen in Einklang mit den gesellschaftlichen Bedarfen geplant, betrieben und weiterentwickelt werden müssen. Die hierfür notwendigen Planungs-, Steuerungs- und Entscheidungsprozesse erfolgen bislang über eine Mischung aus analogen, teildigitalisierten und digitalen Verfahren, die häufig in unterschiedlichen fachlichen Zuständigkeitsbereichen organisiert sind (DIN 2024).

Vor diesem Hintergrund und angesichts der Notwendigkeit, städtische Entwicklungsprozesse stärker an Nachhaltigkeits- und Klimazielen auszurichten, gewinnen UDZ als digitales Instrument zur vorausschauenden, evidenzbasierten Entscheidungsunterstützung zunehmend an Bedeutung. Sie eröffnen neue Möglichkeiten, bestehende Informationsressourcen aus unterschiedlichen Quellen miteinander zu verknüpfen und auszuwerten, Wechselwirkungen sichtbar zu machen, Szenarien zu simulieren sowie Planungs- und Entscheidungsprozesse, beispielsweise durch Visualisierungen städtischer Umgebungen, zu unterstützen. Auf diese Weise können sie ein ganzheitlicheres Planen und Handeln in Kommunen fördern (DIN 2024).

UDZ sind dabei eng mit dem Konzept der Smart City verbunden. Smart-City-Ansätze verfolgen das Ziel, mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien einen Beitrag zur Bewältigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Herausforderungen zu leisten und nachhaltige Lösungen in der Stadtentwicklung zu fördern. In diesem Kontext können UDZ als eine Art digitales Cockpit verstanden werden, das relevante Zustände und Entwicklungen in der Stadt sichtbar macht und so eine datenbasierte Steuerung ermöglicht (DIN 2024).

Eine zentrale Voraussetzung für die Umsetzung von Smart-City-Konzepten und UDZ sind urbane Datenplattformen. Sie bilden die technische und organisatorische Grundlage dafür, heterogene Datenbestände zusammenzuführen und für die Planung, Analyse und Koordination zu nutzen. Die Datenplattformen integrieren unterschiedliche Datenquellen, etwa über Sensorik erfasste Daten, Daten aus der Verwaltung oder solche aus Systemen anderer Städte. Die Datenplattformen müssen vielfältige Anforderungen erfüllen, unter anderem in Bezug auf Datenformate, Schnittstellen, Lizenzen, Rechtemanagement und Datenqualität. Darüber hinaus stellen sich Fragen zu geeigneten Betreiber- und Organisationsmodellen sowie zum langfristigen Betrieb von Datenplattformen. Aufseiten der kommunalen Akteure besteht zudem ein erheblicher Bedarf an entsprechenden Kompetenzen sowie zeitlichen und finanziellen Ressourcen für deren Betrieb (Wangermann 2024).

Das besondere Potenzial von UDZ liegt weniger in einzelnen technischen Funktionen als vielmehr darin, unterschiedliche Daten aus verschiedenen Handlungsfeldern zusammenzuführen und Wechselwirkungen sichtbar zu machen.

Der Fokus der Studie liegt auf der Anwendung von UDZ im Kontext einer nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung. Nachhaltige Stadtentwicklung wird hier im Sinne eines mehrdimensionalen, komplexen Nachhaltigkeitskonzepts verstanden, das ökologische, ökonomische und soziale Dimensionen und damit verbundene Zielsetzungen integriert. Dieses Verständnis geht auf das Aktionsprogramm Agenda 21 der Vereinten Nationen zurück, das im Rahmen der Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro 1992 verabschiedet wurde und seitdem den globalen Handlungsrahmen für nachhaltige Entwicklung bildet.

Die ökonomische Dimension umfasst insbesondere langfristige Wertschöpfung, Effizienz sowie die Stabilität ökonomischer Strukturen. Die soziale Dimension zielt auf Gerechtigkeit, gesellschaftlichen Zusammenhalt und die Sicherung gesellschaftlicher Teilhabe (Kilpert/Qasem 2024). Und die ökologische Dimension beinhaltet neben dem Erhalt der biologischen Artenvielfalt und der Funktionsfähigkeit von Ökosystemen auch den maßvollen Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen, die schonende Nutzung regenerierbarer Naturgüter sowie den Schutz des Klimas (Bertelsmann Stiftung o. J.).

Bei der Anwendung des komplexen Konzepts Nachhaltigkeit als analytisches Kriterium ist es wichtig, die einzelnen Dimensionen nicht isoliert zu betrachten, sondern ihre Wechselwirkungen zu berücksichtigen (DeGEval 2025). Eine Weiterentwicklung des Nachhaltigkeitskonzepts erfolgte im Rahmen der Agenda 2030 der Vereinten Nationen, die 2015 von 193 Mitgliedstaaten verabschiedet wurde und 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals – SDGs) formuliert. Diese adressieren unter anderem die Bereiche Klimaschutz, sauberes Wasser, Gesundheit, Bildung, Armut, Hunger und Frieden (BMUKN o. J.).

Vor diesem Hintergrund bezeichnet der Begriff „nachhaltige Stadtentwicklung“ einen verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen, sozialen und ökonomischen Ressourcen im urbanen Raum – sowohl für die heutige als auch zukünftige Stadtbevölkerung sowie für die in der Stadt lebenden Menschen und Besucher/innen (Breckner 2018). Da Städte in erheblichem Maße zum Ressourcenverbrauch, zu Emissionen, zur Flächeninanspruchnahme sowie zu sozialen Ungleichheiten beitragen, kommt ihnen eine besondere Bedeutung bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen zu. Insbesondere das Nachhaltigkeitsziel 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ verpflichtet dazu, Entwicklungsprozesse und Aktivitäten innerhalb von Städten systematisch an den Prinzipien der Nachhaltigkeit auszurichten (UN o. J.).

Zielstellung

Das vorliegende TA-Kompakt untersucht die Anwendungsmöglichkeiten und Herausforderungen von UDZ im Kontext einer klimaangepassten und nachhaltigen Stadtentwicklung. Ziel ist es, sowohl Potenziale als auch Hemmnisse zu identifizieren und gesellschaftliche Auswirkungen einer zunehmenden Realisierung von UDZ in der Stadtplanung zu beschreiben. Dazu werden der aktuelle Stand der Entwicklung dargestellt sowie ausgewählte praktische Anwendungsfälle beleuchtet. Darauf aufbauend werden mögliche politische Gestaltungsoptionen aufgezeigt.

Ergänzend wurden Perspektiven aus der Bevölkerung einbezogen, um Einsichten darüber zu gewinnen, welche Erwartungen, Bedarfe und Befürchtungen Bürger/innen mit dem Einsatz von UDZ verbinden und welche Implikationen sich daraus für politische Gestaltungsprozesse ergeben.

Die Studie orientiert sich an folgenden sechs Leitfragen:

- Was sind UDZ und welche technischen Voraussetzungen erfordern sie?
- Welche Potenziale bieten UDZ für eine nachhaltige Stadtentwicklung?
- Was sind Hemmnisse für die Entwicklung von UDZ?
- Welche Rahmenbedingungen sind für die Entwicklung von UDZ förderlich?
- Wie können künftige Entwicklungsperspektiven für UDZ aussehen?
- Welche Gestaltungsoptionen lassen sich ableiten und welcher Forschungsbedarf besteht weiterhin?

Vorgehensweise

Es wurde eine Literaturrecherche und -analyse (Desk Research) durchgeführt. Darüber hinaus wurden neun leitfadengestützte Interviews mit relevanten Stakeholdern aus dem Bereich der Stadtentwicklung, Kommunalpolitik, Technologieentwicklung, Forschung und Planung geführt. Darauf aufbauend wurden mithilfe der Szenariotechnik sieben zentrale Schlüsselfaktoren für den Einsatz von UDZ im Kontext einer klimaangepassten und nachhaltigen Stadtentwicklung identifiziert. Auf dieser Grundlage wurden drei mögliche Zukunftsszenarien entwickelt, von

denen aus methodischen Gründen (Kapitel 9.2) zwei im Rahmen eines Fokusgruppenworkshops mit Vertreter/innen der Zivilgesellschaft diskutiert wurden, um Einschätzungen, Bedarfe und Vorbehalte zu erfassen.

Aufbau des Berichts

Der Bericht beginnt mit der Einführung in das Konzept der UDZ und den technologischen Voraussetzungen (Kapitel 2). Danach folgt ein Überblick über Potenziale und Anwendungsfelder von UDZ für nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung sowie ausgewählte Praxisbeispiele (Kapitel 3). Die Grenzen und Herausforderungen bei der nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung mit UDZ werden in Kapitel 4 diskutiert. Anschließend werden Gelingensbedingungen formuliert (Kapitel 5) und in Kapitel 6 drei Szenarien für eine Nutzung von UDZ im Jahr 2035 vorgestellt. Mit einem Resümee und politischen Gestaltungsperspektiven endet der Bericht (Kapitel 7).

Zur Erstellung dieses Berichts wurden generative KI-Tools verwendet, und zwar Perplexity AI für die Textrecherche sowie AitisiGPT für die Erstellung von Zusammenfassungen. Alle KI-generierten Inhalte wurden sorgfältig überprüft und bearbeitet, um Richtigkeit und Ausgewogenheit sicherzustellen. Die Nutzung erfolgte im Rahmen der TAB-Leitlinien für generative KI (TAB 2025). Die endgültige Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit, die kritische Reflexion und die Interpretation der Ergebnisse liegt bei den Autor/innen.

Danksagung

Wir bedanken uns sehr herzlich bei den Expert/innen, die mit ihrem Engagement für Interviews zur Verfügung standen. Ein ebenso herzlicher Dank geht an Christoph Kehl und Arnold Sauter für die Durchsicht des Berichtsentwurfs und hilfreiche Verbesserungsvorschläge sowie Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die Durchsicht und Gestaltung der Endfassung des Manuskripts, außerdem an Jost Lüddecke für das Lektorat sowie Anne-Sophie Piehl für die Erstellung der Grafiken.

2 Urbane digitale Zwillinge für eine klimaangepasste, nachhaltige Stadtentwicklung

- Urbane digitale Zwillinge (UDZ) werden als virtuelle, dynamisch aktualisierte Abbilder von Stadt- und Kommunalsystemen definiert, die Geobasisdaten und bereichsspezifische Fachinformationen modular kombinieren.
- UDZ bieten deskriptive, diagnostische, prädiktive und simulationsbasierte Funktionen, visualisieren komplexe Zusammenhänge (2D-/3D-Karten, Dashboards, AR/VR) und nutzen KI für Mustererkennung, Prognosen und teilautonome Entscheidungen.
- Der Aufbau von UDZ erfordert die Integration heterogener Daten (zu Geobasis, Mobilität, Energie, Klima, soziale Infrastruktur etc.) aus öffentlichen und privaten Quellen.
- Aktuell lassen sich rund 135 Projekt-Initiativen von UDZ in Deutschland identifizieren, von denen die meisten sich noch in Pilot- oder Prototyp-Phasen befinden, während flächendeckende Implementierungen noch ausstehen.

2.1 Definition und Konzept

Definition

Der Begriff des digitalen Zwillings stammt ursprünglich aus dem industriellen Kontext und wurde zu Beginn der 2000er Jahre geprägt (Grieves 2014). Im industriellen Kontext bezeichnet „digitaler Zwilling das virtuelle Abbild eines ausgewählten Teils der Realität, zum Beispiel eines Produktes oder industriellen Prozesses,“ das auf der Grundlage kontinuierlich erhobener Daten erzeugt wird. Werden diese Daten fortlaufend aktualisiert, kann sich der digitale Zwilling dynamisch an Veränderungen des realen Objekts anpassen und dessen Zustand nahezu in Echtzeit abbilden.

Die im digitalen Zwilling gebündelten Daten können gezielt ausgewertet werden, um zu verschiedenen Fragestellungen Erkenntnisse über Eigenschaften, Zusammenhänge oder Entwicklungsdynamiken des realen Systems zu gewinnen. Auf dieser Grundlage lassen sich Simulationen durchführen und mögliche zukünftige Entwicklungen prognostizieren. Digitale Zwillinge dienen damit nicht nur der Abbildung bestehender Zustände, sondern auch der Analyse, Bewertung und vorausschauenden Unterstützung von Entscheidungsprozessen (CUT o. J.).

Die Übertragung dieses Konzepts auf Städte und Kommunen stellt eine Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Idee dar. Während sich digitale Zwillinge im industriellen Kontext in der Regel auf klar abgegrenzte Objekte oder Prozesse beziehen, sind Städte durch eine hohe strukturelle Komplexität, vielfältige Akteurskonstellationen und dynamische Wechselwirkungen gekennzeichnet.

Kasten 2.1 **Definition urbaner digitaler Zwilling**

UDZ dienen im städtischen und kommunalen Kontext als Konzept zur Organisation und Nutzbarmachung aller Daten, die innerhalb bestimmter Bereiche anfallen. „Diese städtischen Daten betreffen vielfältige Aspekte der Stadt, darunter ihre physischen Bestandteile (Gebäude, Verkehrswege, Parks etc.), ihre logistischen Strukturen (Bildungseinrichtungen, medizinische Einrichtungen, Energieversorgung etc.), ihre Akteure (Unternehmen, Gewerbe, Verwaltung, Bürgerschaft etc.) und deren Handlungsprozesse.“ (Wangermann 2024, S. 3 f.)

Ein UDZ bildet also die digitalen Ressourcen einer Kommune ab, wobei technische, organisatorische und rechtliche Aspekte eine Rolle spielen. Den einen umfassenden UDZ gibt es allerdings nicht: Aus den vielen zur Verfügung stehenden Datenbereichen werden je nach Bedarf und Anforderung aus Geobasisinformationen, Anwendungen, Fachdaten, Analysen etc. die erforderlichen Komponenten zu einer Instanz zusammengestellt (fachliche Zwillinge). Eine solche Instanz eines UDZ ergibt somit ein realitätsnahes digitales Abbild eines Stadtausschnittes.

Das Thema „Digitale Zwillinge“ in der Stadtentwicklung wurde in den letzten Jahren von zahlreichen Akteuren aus Wissenschaft, Politik und Verwaltung aufgegriffen und bearbeitet, sodass ein umfassender Wissensbestand vorliegt. Dies spiegelt sich in einer Vielzahl öffentlich zugänglicher Berichte (BBSR 2023b, 2023a; Blüml et al. 2025; Deutscher Städtetag 2023; Richthofen et al. 2023; Sahr et al. 2023) sowie wissenschaftlichen Publikationen (Argota Sánchez-Vaquero 2025; Dembski et al. 2020; Lei et al. 2023; Pan et al. 2024; VanDerHorn/Mahadevan 2021).

Eine besonders relevante Norm ist die 2024 veröffentlichte DIN SPEC 91607 „Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen“ (DIN 2024). Diese definiert grundlegende Begriffe, Handlungsfelder und Nutzungsszenarien für UDZ und bietet praxisorientierte Leitlinien für den kommunalen Einsatz. Sie bildet einen wichtigen Referenzrahmen für diese Studie.

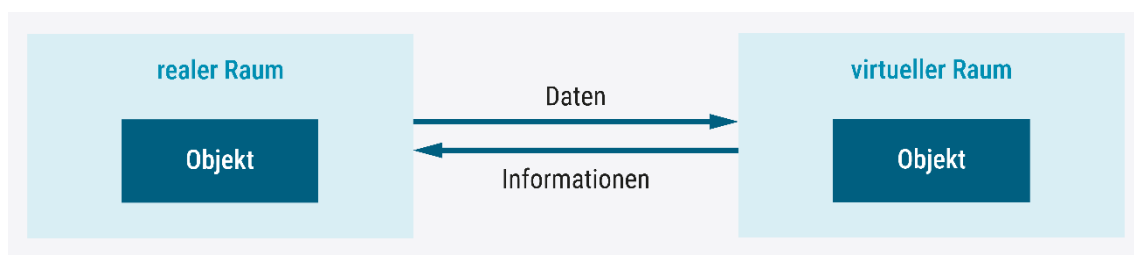
Konzept

Im Kern basiert ein UDZ auf drei miteinander verknüpften Komponenten (Abbildung 2.1):

- der physischen Realität, also der gebauten und belebten Stadt mit ihren Infrastrukturen, Prozessen und Akteuren;
- der modellbasierten, virtuellen Repräsentation dieser Realität; und
- der bidirektionalen Verbindung zwischen physischer und digitaler Ebene, die einen kontinuierlichen Daten- und Informationsfluss sowie eine Rückkopplung, Analyse und – in begrenztem Umfang – eine Steuerung ermöglicht (DIN 2024).

UDZ bauen dabei in der Regel auf bereits bestehende Daten- und Informationssysteme auf und integrieren diese in eine gemeinsame Struktur.

Abbildung 2.1 **Typische Hauptkomponenten urbaner digitaler Zwillinge**



Eigene Darstellung basierend auf DIN (2024, S. 21)

UDZ bilden komplexe, dynamische Systeme ab, in denen städtische Prozesse, Infrastrukturen und (ökologische) Lebensräume digital gespiegelt, simuliert und analysiert werden können. Sie ermöglichen eine strukturierte Erfassung, Integration und Nutzarmachung vielfältiger städtischer Datenbestände. Abhängig von der Datenverfügbarkeit und der jeweiligen Fragestellung können dabei unterschiedliche Aspekte des urbanen Raums erfasst werden, etwa bauliche Strukturen (zum Beispiel Gebäude, Straßen, Brücken, Plätze), technische Infrastrukturen (zum Beispiel Verkehrswege, Energie- und Wasserversorgung, Waren- und Abfallflüsse) oder soziokulturelle Interaktionsräume von Menschen, etwa in Bezug auf Wohnen, Arbeiten und Lernen. Diese Elemente lassen sich in ihrer räumlichen und funktionalen Wechselwirkung analysieren (Wangermann 2024).

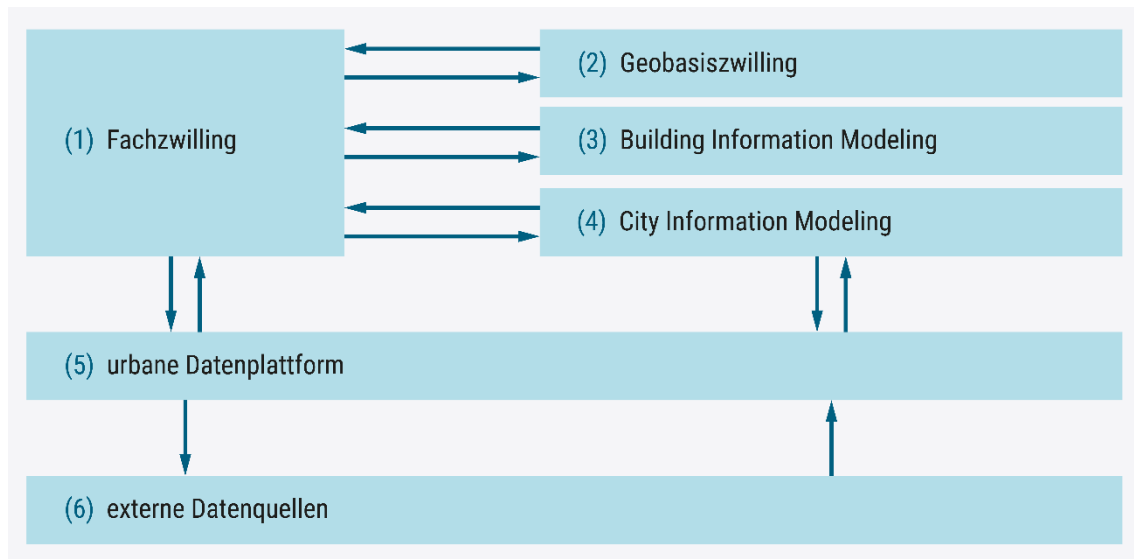
Einbezogen werden können darüber hinaus ökologische Aspekte, wie etwa Wärmeentwicklung, Verschattung, Luftzirkulation oder Biodiversität, sowie sicherheitsrelevante Fragestellungen, beispielsweise die Modellierung von Wasserabflusswegen bei Starkregenereignissen oder die Ausbreitung von Bränden. Damit bieten UDZ grundsätzlich die Möglichkeit, umweltbezogene und risikorelevante Prozesse räumlich zu erfassen und in Planungs- und Entscheidungsprozesse einzubeziehen. Insofern liegt der Mehrwert von UDZ im Kontext einer klimaangepassten und nachhaltigen Stadtentwicklung in der Möglichkeit, ökologische, technische und soziale Daten integriert zu betrachten und Zielkonflikte sowie Synergien zwischen unterschiedlichen Handlungsfeldern sichtbar zu machen.

In letzter Konsequenz existiert im urbanen Kontext kein einzelner übergeordneter UDZ. Stattdessen entsteht häufig ein funktionales Ökosystem aus mehreren spezialisierten digitalen Zwillingen, die sich modular ergänzen und je nach Anwendungsfall kombiniert werden.

Diese spezialisierten digitalen Zwillinge – auch als Instanzen oder Fachzwillinge bezeichnet – erfüllen unterschiedliche Zwecke und sind beispielsweise thematisch (zum Beispiel erneuerbare Energien, Gebäudeenergie, Mobilität, Wohnen), räumlich (zum Beispiel Gesamtstadt, Quartier) oder zeitlich (zum Beispiel Echtzeit, historische Daten, definierte Zeiträume) ausgerichtet. Einzelne Fachzwillinge können zudem miteinander verknüpft werden, etwa Zwillinge mit Schwerpunkt auf Klima- und Umweltaspekten mit solchen, die soziale oder demografische Fragestellungen abbilden (DIN 2024).

In der Regel greifen verschiedene UDZ dabei auf gemeinsame technische Komponenten und teilweise identische Datenquellen zurück (Blüml et al. 2025; Deutscher Städtetag 2023; Schubbe et al. 2023) (Abbildung 2.2). Eine zentrale Informationsressource (nummerierte Elemente in Abbildung 2.2) für viele urbane digitale Zwillinge (1) ist der Geobasisdatenzwilling (2). Dieser umfasst geodätische und georeferenzierte Daten, die den räumlichen Bezug definieren und damit die Verknüpfung fachlicher Daten mit Geoinformationen ermöglichen. Dazu zählen unter anderem hochaufgelöste Luftbilder, aus Laserscanning gewonnene 3D-Punktwolken, digitale Höhenmodelle sowie Katasterdaten (Stadt Wuppertal o. J.).

Abbildung 2.2 **Konzept urbaner digitaler Zwilling**



Eigene Darstellung angelehnt an Deutscher Städtetag (2023, S. 14) und DIN (2024)

Der Geobasisdatenzwilling bildet eine wesentliche Grundlage für Visualisierungen, Simulationen und räumliche Analysen und ist damit für zahlreiche Anwendungsfälle der UDZ von Bedeutung (Deutscher Städtetag 2023). Ergänzend zum Geobasisdatenzwilling können Fachzwillinge mit weiteren daten- und modellbasierten Systemen verknüpft werden. Besonders relevant sind hierbei das Building Information Modeling (BIM)¹ (3), welches die Abbildung von Gebäuden und der Infrastrukturen über den Lebenszyklus ermöglicht, sowie das City Information Modeling (CIM) (4), das die BIM-Methoden aus dem Gebäudewesen auf den Maßstab städtischer Strukturen überträgt.

Die verschiedenen UDZ bzw. Fachzwillinge ebenso wie der Geobasisdatenzwilling greifen auf Fach- und Basisdaten zurück, die in einer urbanen Datenplattform (5) gesammelt, verwaltet und darüber bereitgestellt werden. Diese Plattformen fungieren als zentrale Datendrehscheibe für UDZ.

Tabelle 2.1 in Kapitel 2.2 gibt einen Überblick über mögliche Datenquellen. Ergänzend können externe Datenquellen (6) einbezogen werden, etwa Daten aus Datenplattformen anderer Kommunen oder aus weiteren städtischen IT-Systemen, die bislang (noch) nicht in die urbanen Datenplattformen integriert sind.

2.2 Datentypen und Datenquellen

Für den Aufbau und den Betrieb von UDZ ist die Integration vielfältiger städtischer Datenbestände erforderlich. Diese Daten bilden die Grundlage für Analyse-, Simulations- und Visualisierungsfunktionen und unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihres thematischen Bezugs als auch ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung.

¹ BIM ist eine Methode zur kontinuierlichen Bereitstellung und zum Austausch von Informationen in Bauprojekten. Der Informationsfluss wird in allen Projektphasen über den Gebäudelebenszyklus hinweg koordiniert. Da die Konzepte des BIM-Informationsmanagements nicht auf bauspezifische Abläufe beschränkt sind, können diese auch grundsätzlich von UDZ angewandt werden. BIM-Daten können integriert werden, um detaillierte Informationen über Gebäude und Infrastrukturen zu nutzen.

Zu den relevanten Datentypen zählen unter anderem Informationen zu Gebäudeeigenschaften, etwa Baujahr, Nutzung, eingesetzte Energieträger oder Sanierungszustand (DIN 2024). Ergänzt werden diese durch Mobilitäts- und Verkehrsdaten, die beispielsweise für Emissionsberechnung oder die Bewertung verkehrsbedingter Umweltbelastungen herangezogen werden können (Deutscher Städtetag 2023). Weitere wichtige Datenquellen sind Fernerkundungsdaten wie Satelliten- oder Luftbilder, die unter anderem zur Analyse von Hitzeentwicklung, Dürreperioden oder Flächennutzungsveränderungen genutzt werden. Ebenso relevant sind die Daten aus Baumkatastern oder zu Dachflächenpotenzialen, beispielsweise zur Abschätzung von Verschattungswirkungen oder zur Planung von Photovoltaikanlagen (Deutscher Städtetag 2023).

Die Bandbreite typischer Datentypen, die im Rahmen von UDZ genutzt werden können, ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Sie verdeutlicht, dass UDZ Daten aus unterschiedlichen kommunalen Handlungsfeldern zusammenführen und damit eine integrierte Betrachtung städtischer Systeme ermöglichen.

Tabelle 2.1 **Typische Daten für die Nutzung durch urbane digitale Zwillinge**

Datenkategorie	Beispiele
Geobasisdaten	Gebäudegrundrisse, 3D-Stadtmodelle, Katasterdaten, Geländemodelle, Luftbilder, Flächennutzung
Mobilitätsdaten	Verkehrsflüsse, ÖPNV-Fahrpläne und -Auslastung, Fuß- und Radverkehrsdaten, Parkraumbelegung
Energiedaten	Strom- und Wärmeverbrauch, Energieerzeugung (PV, Wind), Ladeinfrastruktur, Netzauslastung
Klimadaten	Temperaturverläufe, Starkregenereignisse, Hitzekarten, Winddaten, Luftqualität
Gebäudedaten	Baujahr, Nutzungstyp, Energieeffizienzklassen, Sanierungsstatus, Materialien
Soziale Infrastruktur	Kitas, Schulen, Pflegeeinrichtungen, Krankenhäuser, Erreichbarkeiten, Belegungen
Umwelt- und Biodiversität	Grünflächen, Versiegelungsgrad, Baumkataster, Artenverteilung, Biodiversitätsindikatoren
Wasser- und Abwasserdaten	Leitungsnetze, Wasserverbrauch, Überflutungsgebiete, Kanalnetz, Rückhaltebecken
Bevölkerungsdaten	Einwohnerdichte, Altersstruktur, Haushaltsgrößen, sozioökonomische Indikatoren
Wirtschaftsdaten	Branchenverteilung, Arbeitsplätze, Gewerbeflächen, Leerstände, Immobilienpreise
Katastrophenschutzdaten	Evakuierungspläne, Notfallrouten, Risikozonen, Feuerwehrstandorte
Partizipationsdaten	Bürgerbeteiligungen, Umfragen, Feedback aus Beteiligungsplattformen
rechtlich-planerische Daten	Bebauungspläne, Flächennutzungspläne, Baurechtliche Vorgaben, Umweltauflagen

Eigene Zusammenstellung

Die für UDZ genutzten Daten stammen in der Regel aus unterschiedlichen institutionellen Kontexten. Bereitgestellt werden sie unter anderem von kommunalen Einrichtungen, Behörden, kommunalen und privaten Versorgungsunternehmen, Forschungseinrichtungen sowie privatwirtschaftlichen Akteuren (Abbildung 2.3). Diese Vielfalt an Datenquellen verdeutlicht einerseits das große Nutzungspotenzial, deutet andererseits aber auch darauf hin, dass zahlreiche organisatorische und rechtliche Anforderungen damit verbunden sind, einen UDZ zu betreiben.

Abbildung 2.3 Bereitstellende Akteure von Daten zur Nutzung durch UDZ

kommunale Einrichtungen und Stadtverwaltungen > Ämter für Stadtplanung und Bauwesen > Umwelt- und Grünflächenämter > Verkehrs- und Mobilitätsbehörden > IT- und Digitalisierungsabteilungen > Geodateninfrastrukturstellen > Betreiber urbaner Datenplattformen	wissenschaftliche Einrichtungen und Forschung > Universitäten und Hochschulen (insbesondere Institute für Stadtentwicklung, Geoinformatik, Verkehrsplanung) > Forschungsinstitute
Landes- und Bundesbehörden > Landesvermessungs- und Katasterämter > statistische Landesämter > Bundesämter für Umwelt Verkehr, Bau und Stadtentwicklung > Betreiber von Geobasisdaten auf Landes- und Bundesebene	private Unternehmen und Dienstleister > Bau- und Immobilienunternehmen > IT- und Softwarefirmen (z. B. Anbieter von Stadtmodellen, Simulationen, Plattformen) > Beratungsunternehmen im Bereich Smart City und Digitalisierung
öffentliche Versorgungsunternehmen > Energieversorger (Strom, Gas, Fernwärme) > Wasser- und Abwasserbetriebe > Abfallwirtschaftsbetriebe > Telekommunikationsanbieter (z. B. für IoT- und Sensordaten)	öffentliche Verkehrsbetriebe > Betreiber von Bus, Bahn, Straßenbahn > Sharingangebote > Verkehrsverbünde und Mobilitätsdienstleister
	weitere Akteure > Bürger/innen (z. B. durch Croudsourcing, Bürgerbeteiligung) > Nichtregierungsorganisationen (z. B. Umwelt- und Verkehrsverbände) > Betreiber von Smart-City-Infrastrukturen (z. B. Sensorik im öffentlichen Raum)

Eigene Darstellung

2.3 Funktionalitäten, Visualisierungen und Einsatz von KI

Je nach Fragestellung, Datenverfügbarkeit und technischer Ausprägung können UDZ unterschiedliche Funktionalitäten übernehmen. Grundsätzlich lassen sich die Funktionalitäten entlang verschiedener analytischer Ebenen unterscheiden, die von der Beschreibung des aktuellen Ist-Zustands bis hin zur Unterstützung oder teilweisen Automatisierung von Entscheidungen reichen. Die Funktionalitäten werden dabei zunehmend auch durch die technologischen Möglichkeiten von künstlicher Intelligenz (KI) geprägt.

Unterschieden werden deskriptive, diagnostische, prädiktive und simulationsbasierte Funktionalitäten sowie – in weiterentwickelten Formen – selbstlernende und (teil)autonome Entscheidungsfunktionen (Blüml et al. 2025) (Tabelle 2.2). In der praktischen Anwendung sind diese Funktionalitäten häufig miteinander kombiniert; die Übergänge zwischen den einzelnen Ebenen sind fließend. Mit zunehmendem Anspruch an Prognose- und Entscheidungsfähigkeit steigt zugleich der technische, organisatorische und institutionelle Komplexitätsgrad der Systeme. Während deskriptive und diagnostische Funktionalitäten bereits vergleichsweise verbreitet sind, stellen prädiktive und insbesondere simulationsbasierte Anwendungen deutlich höhere Anforderungen an Datenqualität, Modellierung und Rechenleistung. Den höchsten Komplexitätsgrad weisen selbstlernende und (teil)autonome Systeme auf (Blüml et al. 2025; DIN 2024; Weil et al. 2023):

Tabelle 2.2 **Funktionalitäten von UDZ**

	Deskriptiv: Was passiert?	Diagnostisch: Warum passiert es?	Prädiktiv: Was wird passieren?	Simulieren: Was passiert, wenn ...?	(Teil)autonom es Entscheiden: Was soll passieren?
Beispiele	Darstellung und Visualisierung von Oberflächentemperaturen, Versiegelungsgraden, Grün- und Freiflächen, Niederschlagsereignissen	Monitoring von Ist- und Sollzustand, zum Beispiel von Energiesystemen Wechselwirkung zwischen Bebauungsdichte, Materialität, Vegetation und lokaler Hitzebelastung	Prognose von Niederschlägen, Windströmungen, Hitzebelastungen etc.	Bewertung und Ableitung von Empfehlungen zu verschiedenen Maßnahmen, zum Beispiel zur Begrünung, Entsiegelung, Bebauung auf Mikroklima, Abflussverhalten von Wasser oder Aufenthaltsqualität	(teil)autonome Entscheidungen mittels selbstlernender Verfahren; zum Beispiel selbständiges Einleiten von Maßnahmen zum Energie- oder Wassermanagement auf Basis gemessener Zustände in der Stadt
technische Anforderung	Verfügbarkeit statistischer Daten zum physischen Objekt	Anbindung des physischen Objekts mit Sensoren, Internet-of-Things-Geräten etc.	Erweiterung um prognostische Analysemethoden	Verfügbarkeit von Softwareanwendungen zur Simulation	Verfügbarkeit von Softwareanwendungen zur Entscheidungsfindung und Ausführung, KI-gestützte Verfahren

Eigene Zusammenstellung und Ergänzung basierend auf DIN (2024, S. 40 ff.) und Blüml et al. (2025)

- Deskriptive UDZ erfassen relevante Umwelt-, Infrastruktur- und Nutzungsdaten und machen den aktuellen Zustand der Stadt nachvollziehbar. Im Kontext der Klimaanpassung können sie beispielsweise die räumliche Verteilung von Oberflächentemperaturen, Versiegelungsgraden, Grün- und Freiflächen oder Niederschlagsereignissen darstellen. Dadurch werden Hitzehotspots, potenziell überflutungsgefährdete Bereiche oder Defizite in der grünen Infrastruktur sichtbar und vergleichbar. Diese Form der Zustandsbeschreibung bildet die Grundlage für weiterführende diagnostische oder prädiktive Auswertungen, die in datenbasierten Klimaanpassungsstrategien münden können.
- Diagnostische UDZ gehen über die reine Zustandsdarstellung hinaus und ermöglichen es, Ursachen und Zusammenhänge klima- und umweltrelevanter Phänomene zu analysieren. So können etwa Wechselwirkungen zwischen Bebauungsdichte, Materialität, Vegetation und lokaler Hitzebelastung untersucht oder die Ursachen für Überflutungen nachvollzogen werden. Darüber hinaus können Daten aus optischen Sensoren oder Kamerasystemen ausgewertet werden, um Auffälligkeiten, Störungen oder Effizienzprobleme in urbanen Infrastruktursystemen – etwa in der Energieversorgung – zu identifizieren und zu erklären.
- Prädiktive UDZ erweitern diese Analysen um Prognosen zukünftiger Entwicklungen. Auf Basis historischer Daten, aktueller Messwerte und Modellannahmen können sie beispielsweise zukünftige Hitzebelastungen, die Entwicklung des Wasserhaushalts oder die Auswirkungen klimatischer Extremereignisse unter veränderten Rahmenbedingungen abschätzen. Damit unterstützen sie eine vorausschauende Planung und die Bewertung langfristiger Anpassungsstrategien.

- Aufbauend darauf ermöglichen simulationsbasierte UDZ, unterschiedliche Szenarien unter variierenden Annahmen zu modellieren und ihre potenziellen Auswirkungen vergleichend zu analysieren. So kann simuliert werden, wie sich etwa städtebauliche Maßnahmen, zum Beispiel zusätzliche Begrünung, Entsiegelung, veränderte Bebauungsstrukturen oder wasserwirtschaftliche Eingriffe, auf Mikroklima, Abflussverhalten von Wasser oder Aufenthaltsqualität auswirken könnten. Diese „Was wäre, wenn“-Analysen sind insbesondere für Planungsprozesse und die Abwägung alternativer Maßnahmen im Rahmen einer nachhaltigen Stadtentwicklung relevant.
- Die komplexeste Ausprägung stellen UDZ dar, die mithilfe selbstlernender und KI-gestützter Verfahren in der Lage sind, Entscheidungen (teil)autonom vorzubereiten oder zu treffen. Solche Systeme kombinieren kontinuierliche Datenerfassung, Modellanpassung und algorithmische Entscheidungslogiken und bewegen sich damit an der Schnittstelle zwischen Entscheidungsunterstützung und automatisierter Steuerung. Anwendungsbeispiele finden sich etwa im Energie- oder Wassermanagement, bei denen Betriebsstrategien dynamisch an gemessene Zustände angepasst werden können. Derartige Systeme befinden sich bislang überwiegend im Forschungs- und Pilotstadium und werfen Fragen hinsichtlich Transparenz, Verantwortlichkeit und rechtlicher Rahmenbedingungen auf.

Visualisierungen

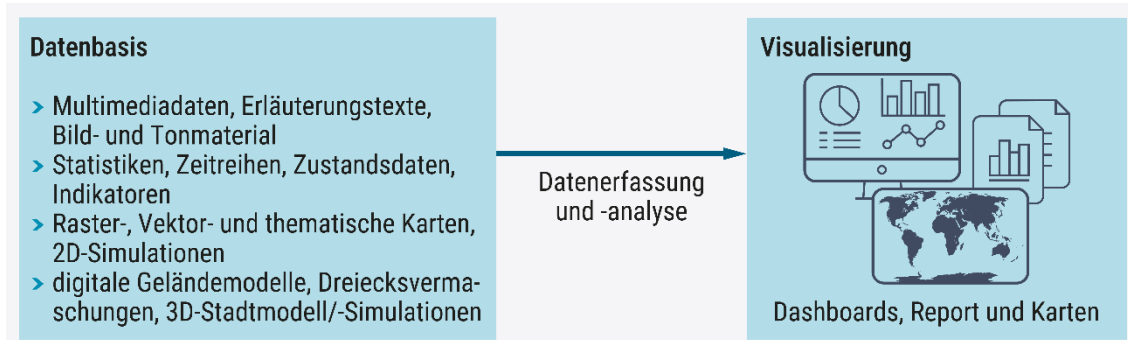
Im Kontext einer klimaangepassten und nachhaltigen Stadtentwicklung kommt der Aufbereitung und Visualisierung von Daten eine zentrale Bedeutung zu. UDZ ermöglichen es, umfangreiche und heterogene Datenbestände – etwa zu Umweltbedingungen, Infrastrukturen, baulicher sowie energetischer Nutzung – zu integrieren, auszuwerten und so aufzubereiten, dass sie für Entscheidungs- und Steuerungsprozesse in Kommunen nutzbar werden (Schubbe et al. 2023). Gerade bei klimarelevanten Fragestellungen, die durch räumliche und zeitliche Dynamiken sowie hohe Unsicherheiten geprägt sind, tragen geeignete Darstellungsformen dazu bei, komplexe Zusammenhänge verständlich und vergleichbar zu machen.

Die Ergebnisse von Analysen und Simulationen werden daher in verschiedene Darstellungs- und Ausgabeformate überführt, die sich an den Bedarfen verschiedener Zielgruppen aus Verwaltung, Politik und in bestimmten Fällen auch der Öffentlichkeit orientieren.

Zu den typischen Ausgabemedien zählen interaktive Dashboards, in denen zentrale Kennzahlen, Indikatoren und Zeitreihen in aggregierter Form dargestellt werden. Dies können beispielsweise Klimakenngrößen sein, die als Zeitreihen visualisiert werden, sodass Entwicklungen über längere Zeiträume nachvollziehbar werden. Auf diese Weise lassen sich Trends, Veränderungen und potenzielle Handlungsbedarfe frühzeitig erkennen.

Kartenbasierte 2D- oder 3D-Darstellungen auf der Grundlage geodätischer Daten machen räumliche Zusammenhänge sichtbar und ermöglichen so zum Beispiel differenzierte Analysen klimatischer Belastungen und Vulnerabilitäten auf unterschiedlichen Maßstabsebenen, etwa auf der Quartiers- oder einzelnen Straßenebene (Stadt Wuppertal o. J.). Ergänzend erlauben zwei- und dreidimensionale Stadtmodelle, bauliche, funktionale oder umweltbezogene Strukturen realitätsnah abzubilden. So können unter anderem Hitzehotspots, Kaltluftentstehungsgebiete oder Abflusswege bei Starkregen anschaulich dargestellt werden (Schlagbauer 2024) (Abbildung 2.4).

Abbildung 2.4 Typische Darstellungsformen von UDZ



Eigene Darstellung basierend auf DIN (2024, S. 43)

Darüber hinaus können aus den mithilfe des UDZ durchgeführten Analysen (teil)automatisierte Berichte generiert werden, die Ergebnisse dokumentieren und für die Verwaltungs-, Planungs- oder Entscheidungsprozesse nutzbar machen. In Kombination mit Augmented(AR)- oder Virtual-Reality(VR)-Technologien erweitern sich die Darstellungsformen um immersive Elemente. Stadträume, Quartiere oder einzelne Maßnahmen können so virtuell erkundet, maßstabsgerecht begehbar gemacht werden, wodurch beispielsweise die potenziellen Auswirkungen von Klimaanpassungsmaßnahmen anschaulich vermittelt werden können (Wangermann 2024).

Einsatz von KI

Aufgrund ihrer rasanten Entwicklung sind Anwendungen der KI eine Schlüsseltechnologie, die auch für UDZ viele Entwicklungspotenziale bieten und deren Funktionalitätsspektrum beeinflussen. Parallel zu den Technologieentwicklungen rund um KI, Big Data und IoT-Technologien entwickeln sich somit auch die Möglichkeiten von UDZ weiter (Weil et al. 2023).

Methoden der KI können beispielsweise genutzt werden, um Zusammenhänge und Muster in großen Datensätzen automatisiert zu erkennen (zum Beispiel Hotspots, Anomalien), Szenarien und Prognosen zu erstellen (zum Beispiel zu Hitzeentwicklung und Luftqualität) und Entscheidungsoptionen zu bewerten (BBSR 2023a; Marx/Seidel 2025). Vor allem jene UDZ, die über rein deskriptive Funktionalitäten hinausgehen, und insbesondere solche, die prognostizieren und (teil)autonome Entscheidungen fällen sollen, können nur mithilfe von KI-Anwendungen realisiert werden (Blüml et al. 2025; BBSR 2023a; Hu et al. 2023; Lei et al. 2023).

Wichtige Ansatzpunkte für KI im Kontext von UDZ sind zum Beispiel (Deutscher Städtetag 2023; m-cons 2025:

- *Datenanalyse und Simulation:* Durch KI können Echtzeitdaten verarbeitet und darauf basierend dynamische, realitätsgetreue Simulationen städtischer Prozesse erstellt werden, etwa eine Simulation der solaren Einstrahlung auf Dächer und Wände.
- *Generierung prädiktiver Aussagen:* Mittels KI können Trends und Entwicklungen prognostiziert werden. Diese Vorhersagen erlauben die vorausschauende Planung von Ressourcen und Infrastrukturen.
- *Automatisierung und Infrastrukturmanagement:* Mit KI lassen sich Versorgungssysteme in Echtzeit überwachen. So können Muster und Abweichungen erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.
- *Beitrag zu Partizipation und Transparenz:* Mittels KI-gestützter Kommunikation können zum Beispiel Kontext- oder Assistenzsysteme unterstützt werden, indem Text oder Abbildungen automatisiert generiert werden.

Neuere KI-gestützte Ansätze gehen dahin, dass georäumliche Daten mittels KI (auch GeoAI) ausgewertet werden, was die georäumlichen Analysen erheblich vereinfacht und zu einer verbesserten Entscheidungsfindung beitragen soll. Allerdings ist die Genauigkeit der GeoAI-Systeme noch nicht sehr hoch. Mit zunehmendem Datenvolumen – etwa durch die Einbindung von Videos – wird ihr Betrieb immer komplexer und fehleranfälliger, weshalb es noch besser entwickelter technologischer Lösungsansätze bedarf (Hu et al. 2023).

Technische Herausforderungen ergeben sich beim Einsatz von KI in UDZ vor allem mit Blick auf Datenqualität, Datengovernance und Datensicherheit (Kapitel 4.1) sowie der Interoperabilität verschiedener Systeme (Kapitel 4.2).

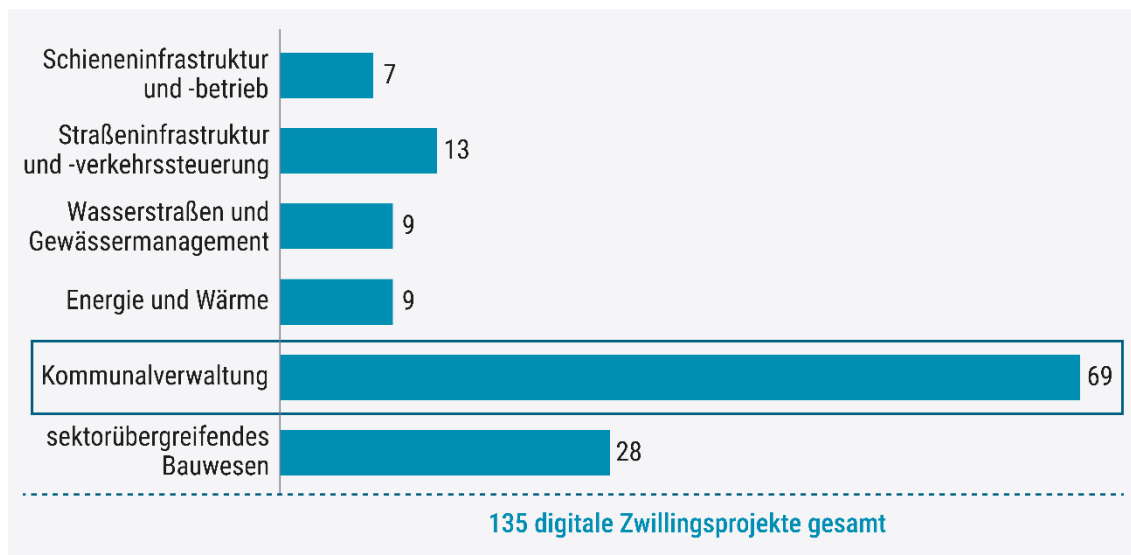
Die zukünftigen Funktionalitäten von UDZ werden maßgeblich davon beeinflusst werden, wie hoch der Einsatz von KI in diesen Systemen letztlich sein wird und inwieweit Entscheidungsabläufe dadurch (teil)automatisiert werden sollen (BBSR 2023a). Dies berührt grundlegende Fragen, die sich generell beim Einsatz von KI stellen, unter anderem: Welche Entscheidungen sollen durch KI getroffen werden? Wer behält die Kontrolle? Wer haftet für diese Entscheidungen?

2.4 Stand der Umsetzung

Ein systematischer Überblick über den Stand und die Umsetzung von UDZ im Kontext einer nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung liegt bislang nicht vor. Allerdings wurden im Rahmen der vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr geförderten Studie „Digitale Zwillinge für Infrastruktur, Bau, Wohnen – von Theorie und Konzeption in die Praxis“ (Blüml et al. 2025) bundesweit 135 Projekte in den Bereichen Infrastruktur, Bauen und Wohnen identifiziert. Zwar beziehen sich nicht alle diese Projekte explizit auf urbane Räume, viele weisen jedoch Schnittmengen zum Themenfeld Stadtentwicklung auf. Allein der in der Studie definierte Anwendungsbereich „Kommunalverwaltung“ umfasst 69 Projekte und damit rund 51 % der erfassten Vorhaben in

Deutschland. Prinzipiell lassen sich bei allen Projekten in den Bereichen Schieneninfrastruktur und -betrieb (9), Straßeninfrastruktur und -betrieb (7), Wasserstraßen und Gewässermanagement (9), Energie und Wärme (9) sowie sektorübergreifendes Bauwesen (28) ein Potenzial für nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung vermuten, weil diese Projekte wahrscheinlich ein oder mehrere Nachhaltigkeitsziele adressieren (Kapitel 3).

Abbildung 2.5 **Verteilung von 135 digitalen Zwillingen in Deutschland in den Bereichen Infrastruktur, Bauen, Wohnen**



Eigene Darstellung basierend auf Blüml et al. (2025, S. 25)

Viele der digitalen Zwillingenprojekte befinden sich noch in der Entwicklung oder in sehr frühen Phasen der Implementierung, beispielsweise in frühen (Test-)Phasen oder im Stadium der Prototypenentwicklung. Eine flächendeckende Implementierung von UDZ steht noch aus und ist mit technischen, organisatorischen und finanziellen Herausforderungen verbunden. Die größte Herausforderung bei der Umsetzung ist zum aktuellen Zeitpunkt die Skalierung von Pilotvorhaben (Blüml et al. 2025).

Die identifizierten Förder- und Umsetzungsaktivitäten zeigen, dass UDZ bislang überwiegend als Querschnittsinstrumente der digitalen Stadtentwicklung adressiert werden. UDZ stellen einen zentralen Baustein bei der Digitalisierung von Kommunen dar. Eine explizite strategische Ausrichtung dieser Maßnahmen auf klimaangepasste und nachhaltige Transformationsprozesse ist dabei in der Regel nicht spezifisch ausgewiesen, stattdessen sind diese eher implizit in übergeordnete Smart-City- oder Digitalisierungsstrategien eingebettet.

3 Potenziale und Anwendungsfelder urbaner digitaler Zwillinge

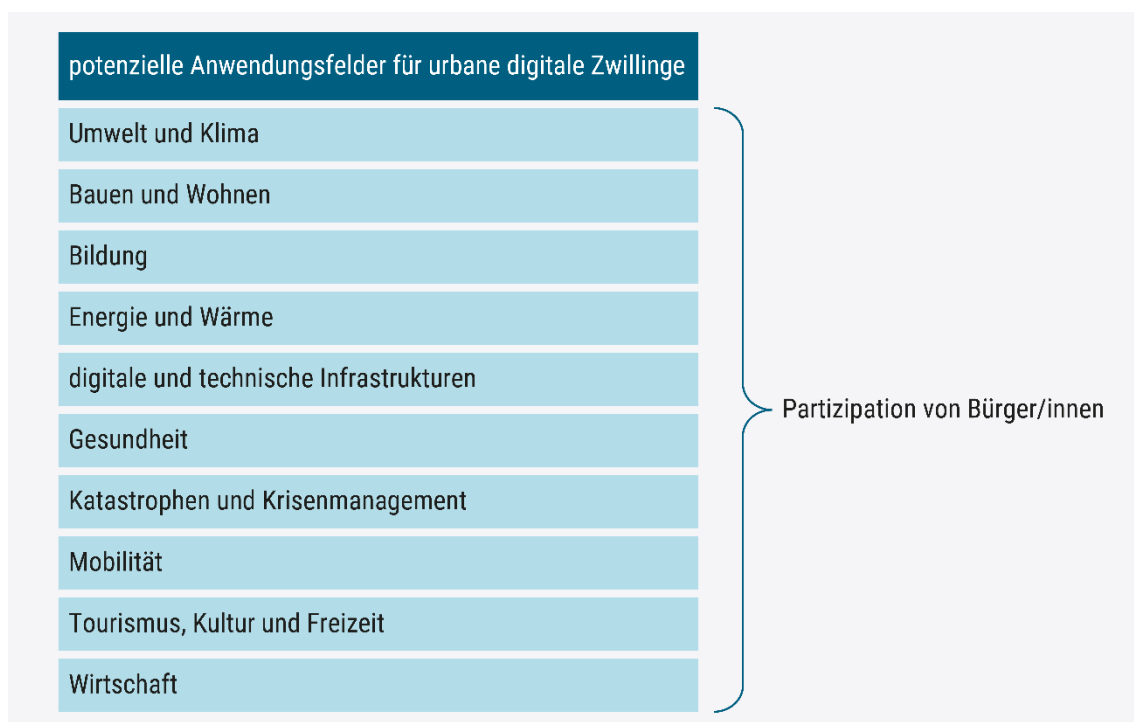
- UDZ können durch Emissionsreduktion, Ressourceneffizienz und transparente Bürgerbeteiligung ökologische, ökonomische und soziale Mehrwerte schaffen.
- Durch die Verknüpfung von Daten- und Simulationstools können UDZ konkrete Beiträge zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele leisten, insbesondere von Ziel 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden) und 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz), aber auch zur Erfüllung weiterer ökologischer, sozialer und ökonomischer Ziele beitragen.
- Exemplarische Praxissteckbriefe zeigen, wie UDZ in der Realität konkrete Nachhaltigkeitsziele unterstützen und wie relevant sie für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung sind, etwa indem sie ein verbessertes Wasser- und Starkregenmanagement ermöglichen, die Analyse von Luftqualität, Hitze und Lärm vereinfachen, dem Energiemanagement dienen sowie die Verkehrsplanung und das Verkehrsmanagement verbessern.

Zur systematischen Darstellung der Potenziale und Anwendungsfelder von UDZ für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung werden im Folgenden zunächst die Nutzen- und Wirkungspotenziale in den verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen (Kapitel 3.1) sowie mögliche Beiträge zu den konkreten Nachhaltigkeitszielen in Form der Sustainable Development Goals (Kapitel 3.2) beschrieben und danach anhand von Praxisbeispielen (Kapitel 3.3) verdeutlicht.

3.1 Nutzen- und Wirkungspotenziale

Typische Anwendungsfelder, wie sie unter anderem in der DIN SPEC (2024) zu UDZ sowie in der einschlägigen Fachliteratur beschrieben werden (BBSR 2023a, 2023b; Blüml et al. 2025; Deutscher Städtetag 2023; Richthofen et al. 2023), umfassen unter anderem die Bereiche Umwelt und Klima, Bauen und Wohnen, Mobilität, Energie und Wärme, digitale und technische Infrastrukturen, Gesundheit, Wirtschaft sowie Katastrophen- und Krisenmanagement. Weitere Anwendungsfelder beziehen sich auf Tourismus, Kultur und Freizeit oder Bildung. Partizipation von Bürger/innen als weiteres Anwendungsfeld ist ein Querschnittsthema, das prinzipiell bei allen hier genannten Anwendungsfeldern eine Rolle spielen kann (Abbildung 3.1).

Abbildung 3.1 **Potenzielle Anwendungsfelder für urbane digitale Zwillinge**



Quelle: nach BBSR (2023a), DIN (2024), Schubbe et al. (2023)

Die Nutzen- und Wirkungspotenziale von UDZ lassen sich entlang mehrerer, miteinander verknüpfter Wirkungsebenen systematisieren. Es werden vier Potenzialkategorien unterschieden, die ökologische, prozessual/wirtschaftliche, soziale sowie daten- und wissensbezogene Aspekte abdecken. Diese Kategorien werden hier getrennt behandelt. Die Potenziale treten bei der Anwendung der UDZ in der Praxis jedoch häufig kombiniert auf. Die nachfolgend aufgeführten Beispiele in den Kategorien dienen der Illustration der jeweiligen Potenziale und verweisen exemplarisch auf typische Funktionen, Analyseverfahren oder Anwendungszusammenhänge von UDZ (BBSR 2023a; vgl. Blüml et al. 2025; DIN 2024). Sie sind nicht als vollständige Aufzählung zu verstehen.

Ökologische und klimabezogene Potenziale

UDZ können einen Beitrag zur klimaangepassten und umweltorientierten Quartiers- und Stadtentwicklung leisten, indem sie ökologisch relevante Prozesse und Wirkzusammenhänge abbilden und analysierbar machen (Fokusgruppe; Abbas et al. 2025; BBSR 2023a; Blüml et al. 2025; DIN 2024; Ebert 2023; Kiehl 2019; Weil et al. 2023). Zu den ökologischen und klimabezogenen Potenzialen zählen zum Beispiel:

- Emissionsminderung, etwa durch simulationsgestützte Analyse von Verkehrs- und Energieszenarien,
- Material- und Ressourceneffizienz, etwa durch simulationsgestützte Planung von Gebäuden, Nachverdichtung oder Lebenszyklusbetrachtungen,
- Klimaanpassung und -verbesserung, etwa mit Analysen zu Hitze-/Kältebelastungen, Starkregenereignissen, Wasserhaushalt, Biodiversität (Deutscher Städtetag 2023),
- Unterstützung integrierter Umwelt- und Klimabewertungen, etwa durch die Analyse von Wechselwirkungen und Zielkonflikten zwischen Bebauung, Freiraum, Klima- und Ressourcenschutz.

Prozessuale und wirtschaftliche Potenziale

Ein weiteres Potenzial von UDZ liegt in der Unterstützung und Optimierung kommunaler Planungs-, Entscheidungs- und Verwaltungsprozesse. Durch die Zusammenführung von Daten und darauf aufbauenden Modellen und Visualisierungen können Abläufe effizienter gestaltet und wirtschaftliche Effekte erzielt werden (Ferré-Bigorra et al. 2022; Hämäläinen 2020; Huzzat et al. 2025; Marx/Seidel 2025). Relevante Potenziale sind unter anderem:

- Effizienzsteigerung in Planung, Genehmigung, Betrieb und Instandhaltung städtischer Infrastrukturen, zum Beispiel durch digital unterstützte Workflows wie automatisierte Erinnerungsfunktionen, verkürzte Genehmigungszeiten, bedarfsgerechte Planung, Systemoptimierungen,
- verbesserte Abstimmung zwischen relevanten Akteuren, zum Beispiel Stadtverwaltungen, Behörden, Versorgungsunternehmen, wissenschaftlichen Einrichtungen, Verkehrsbetrieben, Dienstleistern,
- beschleunigte Entscheidungsfindung, zum Beispiel durch Vergleich verschiedener Szenarien, Was-wäre-wenn-Analysen,
- verbesserte Nutzung vorhandener Verwaltungs- und Fachdaten für Planungs- und Steuerungsprozesse, zum Beispiel Erkennen von Wechselwirkungen und Zielkonflikten,
- Reduzierung von Planungs-, Abstimmungs- und Folgekosten, zum Beispiel durch frühzeitige Identifikation von Konflikten oder nicht intendierten Entwicklungen.
- Optimierung von Geschäftsmodellen, zum Beispiel durch verkehrsabhängige Flottenplanung.

Soziale Potenziale

Neben ökologischen und prozessualen/wirtschaftlichen Aspekten eröffnen UDZ auch soziale Potenziale, insbesondere im Kontext transparenter, nachvollziehbarer und partizipativer Stadtentwicklung. Damit können sie dazu beitragen, die Akzeptanz für Planungsentscheidungen zu erhöhen und soziale Belange stärker bei der Stadtentwicklung zu berücksichtigen (Fokusgruppe; BBSR 2023a; Blüml et al. 2025; DIN 2024). Zu nennen sind hierbei vor allem

- Unterstützung von Beteiligungsprozessen, zum Beispiel durch anschauliche Visualisierung komplexer Inhalte,
- Erhöhung von Transparenz in Planungs- und Entscheidungsprozessen,

- verbesserte Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen, zum Beispiel indem Annahmen, Szenarien und Wirkungen sichtbar gemacht werden,
- bessere Berücksichtigung vulnerabler Bevölkerungsgruppen, zum Beispiel durch räumlich differenzierte Analyse zu Hitze, Lärm, Umweltbelastungen oder Erreichbarkeit,
- verbesserte bedarfsgerechte Bereitstellung von Infrastrukturen der (lokalen) Daseinsfürsorge, zum Beispiel durch Nutzungssimulationen von Wasserverbräuchen, Bedarf an Schulen und Lehrpersonal,
- Vermeidung und bessere Bewältigung gesundheitsgefährdender Krisen oder Gefahrensituationen, zum Beispiel durch Messung von Emissionsgrenzwerten oder Simulation von Überschwemmungen.

Daten- und wissensbezogene Potenziale

UDZ integrieren unterschiedliche Datenbestände und machen diese für Analysen zugänglich. Über diese technische Funktion hinaus eröffnen sie Potenziale für die Unterstützung von Entscheidungen und organisationale Lernprozesse in kommunalen Verwaltungen (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025; DIN 2024). Wesentliche daten- und wissensbezogene Potenziale umfassen:

- Integration heterogener Daten aus vielfältigen Datenquellen zur Erzeugung von Lagebildern, zum Beispiel Verknüpfung von Geobasisdaten, Mobilitätsdaten, Energie- und Klimadaten, Gebäudedaten, Mobilitätsdaten auf Quartiersebene,
- Entscheidungsunterstützung mittels Szenarien und Simulationen, zum Beispiel modellhafte Abschätzung planerischer Maßnahmen und deren Wechselwirkungen mit Verkehrsflüssen, Energiebedarfen, Hitzeentwicklung,
- Beitrag zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit in Planungsprozessen, zum Beispiel durch Modellierung und Dokumentation von Annahmen,
- Unterstützung organisationaler Lern- und Evaluationsprozesse, indem Planungsmaßnahmen mit realen Entwicklungen rückgekoppelt und ex post ausgewertet werden, zum Beispiel Soll-Ist-Vergleiche oder Monitoring von Zielindikatoren.

3.2 Beitrag zu Nachhaltigkeitszielen

Um den Beitrag von UDZ zur nachhaltigen Entwicklung sichtbar zu machen, können deren potenzielle Anwendungsfelder und exemplarische Anwendungsbeispiele den Zielen für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (Nachhaltigkeitsziele/Sustainable Development Goals – SDGs) (Bundesregierung o. J.) gegenübergestellt werden (Tabelle 3.1). Abbildung 3.2 stellt das Ziel dar, Wirkungsschwerpunkte der UDZ im Kontext einer nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung exemplarisch einzuordnen. Die SDGs dienen dabei als übergeordneter normativer Bezugsrahmen, um potenzielle ökologische, soziale und ökonomische Wirkungen darzustellen.

Der Fokus liegt darauf, in welchen primären Nachhaltigkeitsdimensionen relevante Wirkungen zu erwarten sind, ohne zwischen direkten und indirekten Effekten zu unterscheiden. Aufgrund des querschnittlichen Charakters der UDZ können sich die Wirkungen einzelner Anwendungsbeispiele sowohl auf mehrere Anwendungsfelder als auch auf mehrere Nachhaltigkeitsziele und -dimensionen erstrecken.

Mithilfe der Systematisierung in der Tabelle 3.1 wird deutlich, in welchen Bereichen UDZ zur Erreichung nachhaltigkeitsbezogener Zielsetzungen beitragen können. Es zeigt sich, dass UDZ in der Praxis überwiegend als querschnittliche Instrumente der Stadtentwicklung eingesetzt werden. In nahezu allen Anwendungsfeldern adressieren sie mehrere Nachhaltigkeitsziele in den Dimensionen Ökologie, Soziales und Wirtschaft. Wirkungen können sich dabei überlagern, sodass aufgrund dieser Mehrdimensionalität eine eindeutige Zuordnung nur eingeschränkt möglich und sinnvoll ist.

Die Anwendungsbeispiele in Tabelle 3.1 deuten darauf hin, dass diese häufig auf Effizienz-, Optimierungs- und Steuerungsziele ausgerichtet sind und damit einen indirekten Beitrag zu nachhaltigkeitsbezogenen Zielsetzungen leisten, ohne dass die Zielsetzung Nachhaltigkeit ausdrücklich ausgewiesen ist. Insofern werden Aspekte des Klimaschutzes und der Klimaanpassung häufig implizit mitbearbeitet, etwa im Rahmen von Energie-, Mobilitäts- oder Quartiersentwicklungsprojekten. In den Beispielen ist also eine explizite Fokussierung auf die klimaresiliente Transformation von Kommunen zwar seltener, Wirkungen sind aber durch die verschiedenen genannten Anwendungsbeispiele implizit möglich.

Darüber hinaus wird deutlich, dass bei den hier dargestellten Anwendungsbeispielen bestimmte Nachhaltigkeitsziele eine besondere Rolle spielen. Insbesondere SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur), SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden) sowie SDG 13 (Maßnahmen und Klimaschutz) werden von einer Vielzahl der Anwendungsfelder adressiert. Demgegenüber spielen andere Nachhaltigkeitsziele, wie sie etwa in den Anwendungsfeldern Gesundheit oder Bildung adressiert werden, eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 3.2 Nachhaltigkeitsdimensionen und Nachhaltigkeitsziele



Eigene Zuordnung nach BMUKN (o. J.)

Tabelle 3.1 Zuordnung von Anwendungsfeldern und -beispielen zu Nachhaltigkeitszielen

Primäres Anwendungsfeld (fachlicher Kontext)	Anwendungsbeispiele	Nachhaltigkeitsziele (SDG) Dimensionen		
		Umwelt	Soziales	Wirtschaft
Umwelt und Klima	Stadtklimasimulationen (Luftqualität, Hitzeinseln), Simulation von Hochwasser und Starkregenereignissen	6, 7, 13, 14	3	8, 9, 11
Bauen und Wohnen	Wohnungsmonitoring, Management der Grün- und Freiräume (Kulturlandschaft), automatisierte Baugenehmigungsverfahren (Vollständigkeits-/Plausibilitätsprüfungen)	12, 13	3, 11	7, 9
Bildung	Kapazitätsanalysen, Erreichbarkeitsanalysen aus Einzugsgebieten		4, 10, 11	9
Energie und Wärme	Energiemanagement (Simulation von energieeffizienter Modernisierung wie Solarpotenzial, Wärmebedarf, geothermische Energieerzeugung)	7, 12, 13	11	9
digitale und technische Infrastruktur	Management von Infrastrukturen der kommunalen Daseinsfürsorge, Simulation von Auslastungen (in den Bereichen Wasser, Energie, Abfall), Kanalinformationssystem	6, 7, 12, 13	3	9, 11, 17

Gesundheit	Bewertung umwelt- und klimabedingter Gesundheitsrisiken (Simulation von Hitzeentwicklung und Luftverschmutzung), Analyse der Erreichbarkeit medizinischer Versorgung	13	3	8, 11
Katastrophen- und Krisenmanagement	Vulnerabilitätsanalysen (Überflutung, Detonation, Ausfall kritischer Infrastrukturen), Simulation von Naturgefahren, Sicherheitsbewertungen im öffentlichen Raum	6, 14, 15	2, 3, 16	9, 11
Mobilität	Modellierung von Verkehrsflüssen und Verkehrssteuerung, Simulation von Emissionen, Nutzungsszenarien zu Multimodalität, Erreichbarkeitssimulationen	13, 15	3	9, 11
Partizipation	Onlinebeteiligung, Simulation und Visualisierung von Planungsvarianten, Anliegenmanagement	10, 16	11	
Tourismus, Kultur und Freizeit	Simulation von Besucherströmen bei Großveranstaltungen, Abwägung Denkmalschutz vs. Klimaanpassung	12	3, 10	8, 11
Wirtschaft	Standortanalysen für Gewerbe und Dienstleistungen, Analyse von Erreichbarkeiten und regionalen Lieferketten, Bewertung klimabedingter Risiken für Wirtschaftsstandorte	12, 13	3	8, 9, 11

Die Zuordnung der Anwendungsbeispiele zu Anwendungsfeldern erfolgt auf Basis des primären fachlichen Einsatzkontexts. Aufgrund des querschnittlichen Charakters von UDZ adressieren die Anwendungsbeispiele in der Regel sowohl mehrere Anwendungsfelder als auch Nachhaltigkeitsziele und -dimensionen. Die dargestellte Zuordnung ist exemplarisch und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Eigene Zusammenstellung basierend auf den dargestellten Anwendungsfällen in DIN (2024); Abbas et al. (2025); Weil et al. (2023) und mit eigenen Ergänzungen in den Anwendungsfeldern Bildung, Gesundheit, Tourismus, Kultur und Freizeit sowie Wirtschaft.

Um die in Tabelle 3.1 dargestellten Zuordnungen zu Anwendungsfeldern und Nachhaltigkeitszielen zu konkretisieren, zeigt Kasten 3.1 exemplarisch potenzielle Wirkungen von UDZ am Beispiel des Anwendungsfelds „Umwelt und Klima“.

Kasten 3.1 **Potenzielle Beiträge von UDZ zu Nachhaltigkeitszielen am Beispiel des Anwendungsfelds „Umwelt und Klima“**

Umwelt

- SDG 6 – Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen: UDZ können für Simulationen zu Wasserhaushalt, Starkregen und Überflutung genutzt werden. Dadurch lassen sich Wasserressourcen schützen und Maßnahmen zur Optimierung der Wasser- und Abwasserinfrastruktur ableiten.
- SDG 7 – Bezahlbare und saubere Energie: UDZ können zur Analyse und Simulation energiebezogener Umweltwirkungen beitragen, etwa durch die Bewertung von Einsparpotenzialen durch erneuerbare Energien, von Energiebedarfen oder der klimatischen Effekte energiebezogener Maßnahmen.
- SDG 13 – Maßnahmen zum Klimaschutz: UDZ ermöglichen die Simulation, Bewertung und Priorisierung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen (zum Beispiel Hitze, Starkregen) und können mit den Daten eine evidenzbasierte kommunale Klimapolitik unterstützen.
- SDG 14 – Leben unter Wasser: UDZ können indirekt durch die Reduktion von Schadstoffeinträgen in Gewässern zum Schutz aquatischer Ökosysteme beitragen.

Soziales

- SDG 3 – Gesundheit und Wohlergehen: UDZ können helfen, klimabedingte Gesundheitsrisiken insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen (zum Beispiel durch Hitze, Luftbelastung) frühzeitig zu identifizieren und gezielt zu reduzieren.

Wirtschaft

- SDG 8 – Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum: UDZ können durch eine klimaresiliente Stadtentwicklung die Standortattraktivität und Planungssicherheit erhöhen, was die wirtschaftliche Entwicklung befördert.
- SDG 9 – Industrie, Innovation und Infrastruktur: UDZ können den Aufbau resilienter, digital unterstützter Infrastrukturen fördern und innovative Planungs- und Steuerungsprozesse in Kommunen stärken.
- SDG 11 – Nachhaltige Städte und Gemeinden: UDZ können durch Analysen urbaner Risiken und Resilienz von Infrastrukturen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltigere Stadtentwicklung beitragen.

Angepasste und ergänzte Zuordnung der SDGs basierend auf dem Anwendungsfeld „Klimaresiliente Transformation von Kommunen“ (DIN 2024, S. 88 ff.)

3.3 Praxisbeispiele – Steckbriefe

Zur Vertiefung der zuvor dargestellten Anwendungsfelder und Wirkungszusammenhänge der Nachhaltigkeitsziele werden im Folgenden ausgewählte Praxisansätze von UDZ exemplarisch näher betrachtet. Die Auswahl konzentriert sich auf Anwendungsfelder, die eine besondere Relevanz für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung aufweisen. Dazu zählen das Wasser- und Starkregenmanagement (Kasten 3.2), die Analyse von Luftqualität, Hitze und Lärm (Kasten 3.3), das Energiemanagement (Kasten 3.4) sowie Verkehrsplanung und -management (BBSR 2023a; DIN 2024; Pan et al. 2024; Richthofen et al. 2023; Schubbe et al. 2023; CUT 2023) (Kasten 3.5).

Kasten 3.2 **Praxissteckbrief „Wasser- und Abwassermanagement inklusive Starkregen/Überflutung“**

Anwendungsfeld

Umwelt und Klima/digitale und technische Infrastruktur

Kurzbeschreibung des Praxisansatzes

UDZ werden im Wasser- und Abwassermanagement eingesetzt, um Starkregenereignisse, Überflutungsrisiken und die Leistungsfähigkeit städtischer Entwässerungssysteme räumlich und zeitlich differenziert zu analysieren. Auf Basis von Geodaten, hydrologischer Modelle, Niederschlagsdaten und Informationen zu Kanalnetzen und Oberflächenbeschaffenheiten können Abflussprozesse, Rückstaueffekte sowie potenzielle Überflutungsflächen simuliert und bewertet werden.

Typische Funktionen des UDZ

- Simulation von Starkregenereignissen und Oberflächenabfluss
- Modellierung von Kanalnetzen und Entwässerungsinfrastrukturen
- Identifikation von Überflutungsschwerpunkten und Schadenpotenzialen
- Vergleiche von Szenarien (zum Beispiel bauliche Maßnahmen, Entsiegelung, Retentionsräume)
- Unterstützung von Vorsorge-, Investitions- und Notfallplanungen

Beitrag zur nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung

Der Einsatz von UDZ unterstützt Kommunen dabei, Klimarisiken frühzeitig zu erkennen, Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und Schäden durch Extremwetterereignisse zu reduzieren. Gleichzeitig können Zielkonflikte zwischen baulicher Verdichtung, Flächennutzung und Wasserrückhalt sichtbar gemacht werden.

Adressierte Nachhaltigkeitsziele (exemplarisch)

SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden), SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz), SDG 6 (Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen)

Praxisbeispiele Deutschland

- Der Landkreis Hof (hoferLand.digital 2022) beabsichtigt, einen digitalen Zwilling für ein effizienteres und vorausschauendes Wassermanagement zu nutzen. Ziel ist es, Starkregenereignissen besser zu begegnen. Hierzu werden Hochwassersimulationen durchgeführt (BBSR 2023a).
- Die Nachbarstädte Deggendorf und Plattling erarbeiten im Förderprogramm „TwinBy – Digitale Zwillinge für Bayern“² (STMD Bayern o. J.) einen digitalen Zwilling für den Hochwasser- und Katastrophenschutz. Dabei werden Umweltdaten, zum Beispiel von Niederschlagsmengen oder Flusspegelständen, in Echtzeit erfasst und verschiedene Szenarien bei Starkregenfällen oder dem Bruch eines Dammes simuliert (Piqueret Rose 2025).
- Das Projekt „HydroZwilling Rheinland-Pfalz“³ soll Städte und Gemeinden einen effektiveren Umgang mit Starkregen- und Hochwasserereignissen ermöglichen. Die Modellierungs- und Visualisierungssoftware erstellt Überflutungsszenarien für sehr große Gebiete. Das System ist Teil des nach dem Ahr-Hochwasser 2021 entwickelten Plans zur Hochwasservorsorge (Lübbers 2024).
- Im Rahmen des Modellprojekts „Smart City Dresden“ wird seit Mai 2024 an der technologisch-methodischen Erstellung eines Starkregenzwillings gearbeitet, um Starkregenereignisse simulieren und den Hochwasserschutz verbessern zu können (TU Dresden 2024).
- In Hannover zielt das Projektvorhaben „Zwille“⁴ auf die Entwicklung eines digitalen Zwillings für die städtische Abwasserinfrastruktur einschließlich der Einleitungsgewässer.

Praxisbeispiele international

- Das Forschungsprojekt „Hydro-Twin“⁵ (Österreich) zielt auf einen cloudbasierten digitalen Zwilling für das Wassermanagement als Werkzeug für Klimaanpassung, Hochwasserschutz und Planung.
- Anhand des Fallbeispiels in Waterloo (USA) werden verschiedene Flutszenarien in Verbindung mit Disruptionen von Transportwegen simuliert, um daraus Hinweise für den Katastrophenschutz abzuleiten (Kaynak et al. 2025).
- „FloodDAM-DT“⁶ ist ein 2024 beendetes französisch-amerikanisches Kooperationsprojekt. Ziel war es, einen automatisierten Dienst zur Erkennung, Überwachung und Vorhersage von Überschwemmungen auf lokaler und globaler Ebene bereitzustellen.

Kasten 3.3 Praxissteckbrief „Luftqualität/Hitze/Lärm“*Anwendungsfeld*

Luftqualität/Hitze/Lärm

Kurzbeschreibung des Praxisansatzes

UDZ werden zur Modellierung und Prognose von Umweltbelastungen wie Luftschadstoffen, Temperaturverteilungen und Lärmemissionen eingesetzt. Durch die Kopplung von Verkehrs-, Wetter- und Bebauungsdaten können räumlich hochaufgelöste Belastungskarten erstellt und unterschiedliche Planungs- oder Verkehrsszenarien bewertet und priorisiert werden.

Typische Funktionen des UDZ:

- Simulation urbaner Hitzeinseln und thermische Belastung
- Modellierung der Luftqualität, zum Beispiel bezüglich Feinstaub oder Stickstoff
- Lärmkartierung und Szenarien zur Lärminderung
- Bewertung von Planungsvarianten, zum Beispiel Verkehrsverlagerung, Begrünung, Entsiegelung

² <https://www.stmd.bayern.de/themen/twinby/> (21.4.2026)

³ <https://hydrozwilling.rlp.de/> (21.4.2026)

⁴ <https://zwille-projekt.de/> (21.4.2026)

⁵ <https://www.vrvis.at/forschung/forschungsprojekte/hydro-twin> (21.4.2026)

⁶ <https://www.spaceclimateobservatory.org/flooddam-dt> (21.4.2026)

Beitrag zur nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung

Die Anwendungen helfen dabei, gesundheitliche Belastungen in urbanen Räumen sichtbar zu machen und Maßnahmen zur Reduktion von Hitze, Luftverschmutzung und Lärm gezielter zu planen. Neben einer Verbesserung von Umweltaspekten kann auch die Lebensqualität in Städten erhöht werden.

Adressierte Nachhaltigkeitsziele (exemplarisch)

SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen), SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden), SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz)

Praxisbeispiele Deutschland

- Im Rahmen der Modellprojekte „Digitaler Zwilling“ „Resilientes Wolfsburg“ kommt unter anderem die Sensorbox KlimaCube⁷ zum Einsatz, die in Echtzeit verschiedene Umweltparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Wind erfasst.
- Beim „Digitalen Zwilling“⁸ der Stadt Herrenberg geht es unter anderem um ein Monitoring der Feinstaubbelastung. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Modellierung von Emissionen in Verbindung mit dem potenziellen Verkehrsaufkommen, unter Berücksichtigung von Wind, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, um deren räumliche Verteilung präzise zu bestimmen (BBSR 2023a; Dembski et al. 2020; Richthofen et al. 2023).
- Der digitale Zwilling der Stadt Krefeld⁹ ermöglicht unter anderem über Sensoren die Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag, um Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen (Richthofen et al. 2023).

Praxisbeispiele international

- Im Projekt „Cooling Singapore“ (Singapur) werden Stadtklimamodelle erarbeitet, um Hitzeinseln zu identifizieren und Maßnahmen für deren Beseitigung zu entwickeln. Dazu werden Gebäudeinformationen (Lage der Gebäude, Grundrisse, Höhenangaben) und Temperaturdaten von Messstationen erfasst, um daraus Temperaturmodelle zu entwickeln (Gardner 2024).
- In der Stadt Enschede (Niederlande) wurde ein UDZ aufgebaut, der auf der Grundlage eines detaillierten 3D-Modells die Hitzeentwicklung unter verschiedenen Wetterbedingungen in der Stadt simuliert (Koeva et al. 2024).

Kasten 3.4 Praxissteckbrief „Energiemanagement auf Quartiers- und Stadtebene“*Anwendungsfeld*

Energie und Wärme/Umwelt und Klima/Digitale und technische Infrastruktur

Kurzbeschreibung des Praxisansatzes

UDZ im Energiemanagement werden zur Analyse und Optimierung von Energieerzeugung, -verteilung und -verbrauch eingesetzt. Dabei werden unter anderem Gebäudedaten, Verbrauchsdaten und Informationen zu erneuerbaren Energiequellen integriert, um unterschiedliche Energie- und Versorgungsszenarien zu simulieren.

Typische Funktionen des UDZ

- Simulation von Energiebedarfen (Strom, Wärme, Kälte)
- Analyse von Potenzialen erneuerbarer Energien, zum Beispiel Solar, Geothermie
- Modellierung von Wärmenetzen und dezentralen Versorgungssystemen
- Szenarien zur energetischen Sanierung
- Bewertung von Emissionsminderungen

⁷ <https://www.wolfsburg.de/digital/smart-city/klimacube> (21.4.2026)

⁸ <https://www.herrenberg.de/de/Rathaus/Buergerservice/Buergerservice-A-Z/Dienstleistung?view=publish&item=service&id=2802> (21.4.2026)

⁹ <https://www.krefeld.de/de/geoportal> (21.4.2026)

Beitrag zur nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung

Durch simulationsgestützte Analysen können Kommunen Strategien zur Reduktion von Emissionen, zur Steigerung der Energieeffizienz und Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Energiesystems entwickeln. Quartiersbezogene Besonderheiten können berücksichtigt und Zielkonflikte zwischen Wirtschaftlichkeit, Klimaschutz und Versorgungssicherheit erarbeitet werden.

Adressierte Nachhaltigkeitsziele (exemplarisch)

SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie), SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden), SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz)

Praxisbeispiele Deutschland

- Mit dem digitalen Zwilling der Stadt Hof werden Flächen für regenerative Energien ermittelt. Bürger/innen sollen schnell herausfinden können, ob das eigene Dach für Stromerzeugung oder Warmwasseraufbereitung geeignet ist (Richthofen et al. 2023).
- Die Stadt Sulzbach-Rosenberg führt Analysen klimarelevanter Bedarfe und Anpassungserfordernisse mittels eines 3D-Stadtmodells und einer urbanen Datenplattform durch. Bei der Datenplattform handelt es sich um eine IoT-Plattform, bestehend aus Sensoren, mit denen Echtzeitdaten erfasst werden können. Auf Basis von Klimadaten werden Einzelmaßnahmen abgeleitet (Richthofen et al. 2023).

Praxisbeispiele international

- Helsinki (Finnland) nutzt ein visuelles 3D-Modell, das technische Daten zu Gebäuden, Infrastruktur und Umwelt integriert. Mit dem digitalen Zwilling wird unter anderem die Energieeffizienz der Stadt bewertet (vc systems 2025).
- Die Stadt Turin (Italien) nutzt ihren digitalen Zwilling für sehr verschiedene Zwecke. Das Modell erfasst den Zustand der Vegetation, der Straßenoberflächen, Gehwege und Beschilderungen. Eine besondere Anwendung fokussiert auf den Bereich der erneuerbaren Energien, beispielsweise die Berechnung des Solarpotenzials von Dächern und die Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden (Boccardo et al. 2024; Politecnico di Torino 2025).

Kasten 3.5 Praxissteckbrief „Verkehrsplanung und Verkehrsmanagement“*Anwendungsfeld*

Mobilität/Umwelt und Klima/Digitale und technische Infrastruktur

Kurzbeschreibung des Praxisansatzes

UDZ werden im Bereich der Verkehrsplanung und des Verkehrsmanagements eingesetzt, um Verkehrsströme, Mobilitätsnachfrage und deren Auswirkungen auf Umwelt und Stadtraum zu analysieren. Dazu werden Verkehrs-, Infrastruktur-, Emissions- und teilweise Umweltdaten in digitalen Modellen zusammengeführt, um unterschiedliche Verkehrs- und Nutzungsszenarien zu simulieren.

Typische Funktionen des UDZ

- Modellierung und Simulation von Verkehrsflüssen
- Analyse von Emissionen und Lärmbelastungen
- Erreichbarkeits- und Einzugsgebietsanalysen für unterschiedliche Verkehrsmittel
- Szenarien zur Förderung multimodaler Mobilität
- Vergleiche von Szenarien zur Verkehrsverlagerung und Netzoptimierung
- Bewertung von Maßnahmen (zum Beispiel Verkehrsberuhigung, neue Infrastrukturen, Umverteilung von Straßenraum)

Beitrag zur nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung

Durch simulationsgestützte Analysen unterstützen UDZ Kommunen dabei, Maßnahmen zur Reduktion verkehrsbedingter Emissionen, zur Entlastung belasteter Stadträume und zur Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen zu entwickeln. Verkehrsbezogene Anwendungen leisten damit einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Verbesserung der Umwelt- und Lebensqualität in Städten.

Adressierte Nachhaltigkeitsziele (exemplarisch)

SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden), SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz), SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen)

Praxisbeispiele Deutschland

- Die Stadt Herrenberg nutzt den digitalen Zwilling unter anderem für Routenvorschläge zur Verbesserung der multimodalen Navigation. Dazu werden herkömmliche Karten- und Navigationsdienste, wie Google Maps, mit zusätzlichen Informationen angereichert, zum Beispiel mit dynamischen Sensordaten aus den Bereichen ÖPNV und Mikromobilität. Außerdem wird ein intelligentes Parkraummanagement unterstützt, das über Sensorik den Belegungsstatus verschiedener Parkhäuser in Echtzeit ausgibt (Richthofen et al. 2023).
- In der Stadt Kempten wird der digitale Zwilling unter anderem zur Unterstützung der Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur genutzt: Dort werden Fachdaten zur Kontrolle von Straßen, Bäumen und Spielplätzen mit einem Geoinformationssystem verknüpft, um Sanierungsbedarfe zu identifizieren (Richthofen et al. 2023).
- Die Stadt Krefeld nutzt den digitalen Zwilling unter anderem für das Parkraummanagement, wodurch freie Parkplätze auf der Straße in Echtzeit mittels Sensoren lokalisiert werden können (Richthofen et al. 2023).
- In der Stadt Sulzbach-Rosenberg dient eine Anwendung des digitalen Zwillings dazu, mittels Sensoren Besucherströme zu erfassen, um so Besucherhotspots in der Innenstadt zu identifizieren (Richthofen et al. 2023).

Praxisbeispiele international

- In London (Vereinigtes Königreich) soll der Emissionsausstoß der U-Bahn verbessert werden. Über Sensoren werden Emissionen gemessen und mit Geoinformationsdaten verknüpft dargestellt. Auf Basis von Echtzeit- oder Fast-Echtzeit-Daten soll die Verkehrssteuerung optimiert werden, indem Emissionsschwerpunkte ermittelt und Maßnahmen zur Emissionsminderung ergriffen werden. Zunächst nur als Prototyp auf einer Linie realisiert, soll der digitale Zwilling potenziell alle Londoner U-Bahnlinien umfassen (Lago o. J.).
- Die Städte Basel und Zürich (Schweiz) zielen mit einem digitalen Zwilling darauf, zukünftig Verkehrsanalysen und -simulationen durchzuführen. Dazu werden Daten zu Verkehrsmenge, -dichte, -fluss und -geschwindigkeit genutzt (Anz 2025; Kanton Basel-Stadt 2025; Stadt Zürich 2020).

4 Grenzen und Herausforderungen

- Die Skalierbarkeit und technische Leistungsfähigkeit von UDZ wird durch begrenzte Hardware- und Netzwerkinfrastruktur, anspruchsvolle Datenerfassung, -übertragung, -verarbeitung und -visualisierung sowie den hohen Ressourcen- und Energieverbrauch eingeschränkt.
- Fragmentierte Datenquellen, unterschiedliche Datenformate und mangelnde Standards erschweren den Datenaustausch, die Integration und die bidirektionale Anbindung von UDZ.
- Die hohen Anfangsinvestitionen sowie laufende Betriebs- und Folgekosten von UDZ, die Unsicherheit der langfristigen Finanzierung und bislang fehlende quantifizierte Nutznachweise stellen vor allem kleinere Kommunen mit begrenzten Haushaltsmitteln vor finanzielle Herausforderungen.

Obwohl UDZ ein hohes Potenzial für eine nachhaltige und effiziente Stadtentwicklung aufweisen, stehen ihrer Anwendung bislang noch erhebliche technische und finanzielle Herausforderungen entgegen.

4.1 Technische Machbarkeit

Hardware- und Netzwerkinfrastruktur von UDZ

Eine zentrale Herausforderung bei Aufbau und Nutzung UDZ betrifft die zugrunde liegende Hardware- und Netzwerkinfrastruktur zur Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und Visualisierung von Daten.

- *Erfassung:* Für die Generierung von Echtzeitdaten sind Sensoren und IoT-Geräte unerlässlich (BBSR 2023a). Der Ausbau entsprechender Sensornetze ist bislang jedoch begrenzt. Probleme bestehen unter anderem hinsichtlich Zuverlässigkeit, Kalibrierung, Datenintegration sowie bei der Minimierung von Störsignalen. Probleme ergeben sich zudem bei der Echtzeiterfassung von Daten, da hierfür eine kontinuierliche Konnektivität, hohe Aktualisierungsfrequenzen und Synchronität erforderlich sind, was bislang jedoch nur eingeschränkt gewährleistet werden kann. In Zusammenhang mit der Nutzung von Sensorik gewinnen Open-Source-Technologien zunehmend an Bedeutung (BBSR 2023a, 2023b). Mit diesen lassen sich Sensornetze kostengünstig aufbauen. Die Anwendung von Open-Source-Technologien wird von Expert/innen aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft befürwortet, um die Datenerfassung zu zentralisieren und den Datenzugang zu vereinfachen (Interviews Anonym, Füller, Kringer, Seelig).
- *Übertragung:* Eine weitere Herausforderung ergibt sich bei der Übertragung der gesammelten Daten an Rechenzentren. Hier besteht häufig ein Engpass in der Netzwerkinfrastruktur: Für die Übertragung großer Datenmengen ist eine hohe Netzbandbreite unerlässlich, jedoch sind die aktuell verfügbaren Netzwerkprotokolle – wie das Long Range Wide Area Network (Open-Source-Netzwerkprotokoll) – meist unzureichend für den durch IoT-Systeme generierten Datenstrom (Weil et al. 2023).
- *Verarbeitung:* Ausgehend von den unterschiedlichen Datenquellen und -typen (Kapitel 2.2) werden verschiedene Methoden eingesetzt, um die Daten zu verarbeiten, zu speichern und bereitzustellen (Computinglösungen). Im Kontext von UDZ lassen sich vier Computingansätze unterscheiden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile mit sich bringen (Weil et al. 2023):
 - On-Premise Computing bezeichnet den Betrieb der gesamten IT-Infrastruktur und Softwareanwendungen innerhalb der eigenen Organisation. Dies bietet maximale Kontrolle über die IT-Umgebung und Datensicherheit sowie eine maßgeschneiderte Anpassung an individuelle Anforderungen. Allerdings sind sowohl die Einrichtung als auch die Wartung kostenintensiv, und die Skalierbarkeit ist im Vergleich zu Cloudlösungen begrenzt.
 - Cloud Computing stellt Rechenressourcen wie Speicher, Rechenleistung und Software über das Internet bereit. Es bietet die Möglichkeit der Skalierbarkeit und den Vorteil, dass nur für tatsächlich genutzte Ressourcen gezahlt werden muss. Dennoch können bei umfangreichen UDZ auch hier hohe Kosten anfallen, und es bestehen Sicherheits- und Datenschutzbedenken.
 - Edge Computing, also die dezentrale Datenverarbeitung, verlagert die Datenverarbeitung näher an die Datenquelle, wodurch die zu übertragende Datenmenge reduziert wird. Dies steigert die Reaktionsfähigkeit von Anwendungen und kann kosteneffizient sein. Die Verwaltung und Wartung der Edge-Geräte ist jedoch komplex, und es stellen sich hohe Anforderungen an die Datensicherheit.

- Schließlich verbindet Cluster Computing mehrere Computer zu einem einzigen System, was Rechenleistung und Speicherkapazität erhöht und Skalierbarkeit sowie Fehlertoleranz verbessert. Allerdings sind auch hier die Einrichtung und Wartung teuer, und es kann zu Problemen bei der Datenkonsistenz und -koordination zwischen den einzelnen Knoten kommen.

Die Auswahl und der Einsatz einer spezifischen Computinglösung hängen stark von den vorhandenen finanziellen, technischen und personellen Ressourcen ab. Außerdem wird die Auswahl durch die festgelegten Datengovernancestrukturen (Kapitel 5.1) der jeweiligen Anwendungsfälle mitbestimmt.

- *Visualisierung*: Um mit UDZ gut arbeiten zu können, werden unterschiedliche Formen der Datenaufbereitung genutzt – von Kartendarstellungen bis hin zu komplexen 3D-Modellen (Kapitel 2.3). Die dafür erforderlichen Rechenkapazitäten stoßen angesichts stetig wachsender Datenmengen aus dem IoT, der zunehmenden Komplexität von 3D-Modellen sowie der hohen Renderinganforderungen für Anwendungen im Bereich Augmented Reality (AR) an ihre Grenzen (Weil et al. 2023).

In der praktischen Umsetzung zeichnet sich ab, dass UDZ nicht beliebig detailliert und umfassend gestaltet werden können, weil technische Grenzen beispielsweise hinsichtlich der Datenverarbeitungskapazität schnell erreicht sind. Daher ist eine umfassende Datengovernancestruktur (Kapitel 5.1) erforderlich, um eine Ausgewogenheit zwischen Ressourcenverfügbarkeit sowie technischer Machbarkeit und Nutzbarkeit zu gewährleisten.

Ressourcenverbrauch und ökologisch nachhaltiger Betrieb

Die Erstellung und der Betrieb von UDZ sind mit einem erheblichen Ressourcenverbrauch verbunden. Dies betrifft sowohl die benötigte Hard- und Softwareinfrastruktur als auch den Energieverbrauch für die Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung. Mit der zunehmenden Verbreitung vernetzter Sensorik, dem Einsatz komplexer 3D-Stadtmodelle, der Verwendung daten- und rechenintensiver KI-Verfahren sowie der Integration von AR-Anwendungen steigen die technischen Anforderungen und damit auch der Energiebedarf erheblich an. Die konkreten Umweltwirkungen von UDZ insbesondere mit Blick auf den Energieverbrauch sind noch nicht vollständig abschätzbar. Gleichwohl sollten diese potenziellen Effekte bereits heute in Kosten-Nutzen-Analysen einbezogen werden.

Gerade vor dem Hintergrund, dass UDZ dazu beitragen sollen, eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung zu unterstützen, unterliegen ihre Entwicklung und ihr Betrieb selbst der Verpflichtung, Nachhaltigkeitskriterien zu erfüllen. Das umfasst nicht nur den Einsatz energieeffizienter Technologien, die Nutzung erneuerbarer Energien und die Optimierung datenintensiver Prozesse, sondern auch die kritische Reflexion ihres ökologischen Fußabdrucks entlang des gesamten Datenlebenszyklus, das heißt von der Datenerhebung über die Verarbeitung bis hin zur langfristigen Speicherung und Nutzung.

4.2 Interoperabilität unterschiedlicher technischer Systeme

Interoperabilität und technische Standards

Die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Quellen ist essenziell. Eine zentrale Herausforderung für den Aufbau und die Nutzung von UDZ besteht jedoch in der Fragmentierung und Heterogenität der zugrunde liegenden Daten- und Systemlandschaft, die oftmals durch mangelhafte Datenaustauschformate und Datensilos gekennzeichnet ist (DIN 2024, S. 45).

Ein Ansatzpunkt ist die Integration von Daten in eine urbane Datenplattform (UDP), die dazu beitragen kann, bestehende Datensilos aufzubrechen und eine zentrale Anlaufstelle für das Datenmanagement zu schaffen (Deutscher Städtetag 2023; Wangermann 2024). Voraussetzung hierfür ist jedoch die hinreichende Verfügbarkeit, Detailliertheit und Standardisierung der Daten, damit diese mit möglichst wenig Bearbeitungsaufwand zusammengeführt werden können (Interviews Anonym, Stubert).

Die Standardisierung von Daten bezogen auf Speicher- und Austauschformate verhindert nicht nur die Abhängigkeit von einzelnen Anbietern („Vendor Lock-in“), sondern erleichtert auch die Integration bestehender IT-Systeme der öffentlichen Verwaltung (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Hierfür relevante Standardisierungs- und Referenzrahmen für UDZ umfassen die DIN SPEC 91607 „Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen“ (DIN 2024) als konzeptionellen Handlungsrahmen, XPlanung¹⁰ als standardisiertes Austauschformat für Bauleitpläne

¹⁰ Dabei handelt es sich um einen Datenstandard und ein Datenaustauschformat für die Digitalisierung der räumlichen Planung in Deutschland (BBSR 2023a, S. 25).

und BIM als methodischen Standard für digitale Planungsprozesse (Schubbe et al. 2023) sowie Spezifikationen des Open Geospatial Consortium (OGC) für interoperable Geodaten- und Webdienste (Richthofen et al. 2023; Schubbe et al. 2023).

Für die Harmonisierung heterogener Datensätze ist auch deshalb ein einheitliches Format für den Datenaustausch notwendig, da die Daten oftmals räumlich verteilt vorliegen und aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen stammen (Schlagbauer 2024). Dazu müssen die verwendeten Austauschformate, zum Beispiel STEP, XML, JSON, JSON-LD, und die einzuhaltenden Lieferprozesse spezifiziert werden. Die Wahl des Datenmodells, zum Beispiel IFC oder CityGML,¹¹ ist eine wesentliche Entscheidung für die Interoperabilität von Informationen aus unterschiedlichen Quellen in einem UDZ (DIN 2024).

Darüber hinaus gewinnt die Bidirektionalität zwischen UDZ und physischen Systemen (Sensornetzwerke, Messstationen etc.) zunehmend an Bedeutung, da ohne sie (teil)autonome Entscheidungssysteme des UDZ nicht realisiert werden können (Tabelle 2.2). Erst ein kontinuierlicher, bidirektionaler Datenaustausch zwischen realer und digitaler Welt ermöglicht es, Veränderungen in Echtzeit zu erfassen und darauf aufbauend fundierte präventive Planungsentscheidungen zu treffen (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Bislang dominieren jedoch unidirektionale Verbindungen, insbesondere im Kontext der Steuerung nachhaltiger Stadtentwicklungssysteme. Das heißt, Daten werden gesammelt, aufbereitet und in Planungsprozesse eingespeist (Input). Die Rückführung der Ergebnisse (Output) zu den relevanten Verwaltungseinheiten oder in die Öffentlichkeit stellt den Schritt vom UDZ als Analysewerkzeug zu einem aktiven Steuerungsinstrument dar. Im Rahmen der klimaangepassten Stadtentwicklung könnte dies bedeuten, dass über ein Sensornetzwerk Hitzeinseln in einer Stadt entdeckt werden, die Verwaltung auf Grundlage einer Analyse Gegenmaßnahmen, beispielsweise zusätzliche Verschattung im öffentlichen Raum, entwickelt und umsetzt und die Erkenntnisse über die Wirkung dieser Gegenmaßnahmen wiederum in den UDZ eingespeist werden.

Datenqualität

Daten sind das Fundament von digitalen Zwillingen, ihre Qualität und Verfügbarkeit sind entscheidend für die Funktionalität von UDZ. Die vernachlässigte Aktualität, fehlende Genauigkeit, Messfehler und unzureichender Detaillierungsgrad der Daten erschweren bislang die Erfassung von Daten in bestmöglicher Qualität (Blüml et al. 2025; Richthofen et al. 2023). Wichtige Faktoren für eine optimale Datenqualität sind die Dateninventur, also die strukturierte Erfassung aller existierender Datenbestände, das Datenmodell, also das Aufbewahrungs-, Verwaltungs- und Nutzungssystem der Daten, sowie die Datenpersistenz, also die Langfristigkeit der Speicherung und Verwendbarkeit der Daten (Blüml et al. 2025).

- *Metadaten und Metadatenkataloge:* Ein Kriterium für die Datenqualität ist der Stand der Metadaten und Metadatenkataloge. Metadaten sind Daten über Daten und dienen der Beschreibung von Informationsressourcen. Sie umfassen Aspekte wie Klassifizierung, Datenherkunft, Datenqualität, Aktualität, Datenbeschreibungen sowie Nutzungs- und Zugriffsrechte (DIN SPEC 91607, DIN EN ISO 19115-1). Ein Metadatenkatalog ist eine strukturierte Sammlung von Metadaten, die Informationen über die gesamten Datenbestände einer Kommune oder Stadt bieten. Im Kontext von UDZ sind Metadaten besonders relevant, da es nicht mehr nur um einzelne Datensätze geht, sondern auch um deren Vernetzung. Prozesse und Analysen selbst müssen beschrieben und die verwendeten Parameter transparent gemacht werden, um die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen und die Zuverlässigkeit der genutzten Ressourcen sicherzustellen. Zur Interoperabilität von Metadaten definiert der internationale Standard DCAT-AP Datenmodelle für Katalogsysteme und zum Informationsaustausch für öffentliche Daten in Europa. DCAT-AP.de¹² ist das gemeinsame deutsche Metadatenmodell für den Austausch von offenen Verwaltungsdaten. Trotz dieser Vorgaben weisen die befragten Expert/innen zum Teil darauf hin, dass einheitliche Systeme für die Datenbeschreibung und die entsprechende Pflege der Systeme für eine effiziente Datenverwendbarkeit noch fehlen (Interviews Anonym, Zienert).
- *Datenaktualität:* Die Aktualität der Daten ist ebenfalls eine wichtige Anforderung, da veraltete Daten zu Fehlinformationen und -entscheidungen führen können (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Die Aktualisierung der Informationsbestände unterliegt häufig unterschiedlichen Zyklen, die je nach Projekt und Datentyp variieren können. Während beispielsweise der Gebäudebestand oder auch das Straßen- und Wegenetz über mehrere Monate bzw. Jahre unverändert bleiben können, eine Aktualisierung entsprechender Daten also in größeren Abständen erfolgen kann (statische, anlassbezogene Daten), sind andere Daten dynamischer Natur und werden häufiger aktualisiert (Schubbe et al. 2023, S. 18). Dazu zählen bestimmte gebäudespezifische Daten,

¹¹ Standardisiertes Austauschformat für Geodaten im urbanen Kontext (BBSR 2023a, S. 14).

¹² <https://www.dcat-ap.de/> (21.4.2026)

zum Beispiel zum Sanierungsstand, zu Emissionen oder demografische Daten, die oft monatsweise relevant sind, etwa für Planungen konkreter Klimaanpassungsmaßnahmen auf Quartiersebene. Tageweise werden beispielsweise Daten zum Wetter aktualisiert, während in Echtzeit Daten über Verkehrsflüsse, Luftqualität oder auch Energieverbräuche erhoben werden (DIN 2024, S. 24; Interviews Anonym, Zienert).

- *Detailtiefe und Vollständigkeit:* Der Anspruch an die Detailtiefe von Daten hängt vom spezifischen Anwendungsfall der UDZ ab und davon, welche Informationsbedarfe bei Nutzer/innen bestehen. So sind etwa bei 3D-Visualisierungen unterschiedliche Auflösungsstufen je nach Zweck zu realisieren. Bei der Simulation von Umweltauswirkungen sind auf Quartiersebene höhere Detaillierungsgrade erforderlich als bei der informativen Darstellung großräumiger Gebiete, beispielsweise bei Hitzekarten (Dembski et al. 2020). In der Praxis wird die Vollständigkeit notwendiger Daten noch als lückenhaft angesehen (Interview Dembski; Richthofen et al. 2023).
- *Systematische Verzerrungen:* Letztlich ist auch der Umgang mit Bias, also systematischen Verzerrungen bei der Datengenerierung und -qualität, eine Herausforderung, wie verschiedene Expert/innen konstatieren (Marx/Seidel 2025, S. 2; Interview Füller). Wenn nur jene Daten erhoben werden, die bereits bekannt sind bzw. sich leicht messen und quantifizieren lassen und von den Beteiligten als relevant erachtet werden, dann laufen die resultierenden Modelle Gefahr, den bestehenden Status quo lediglich abzubilden, anstatt ihn kritisch zu hinterfragen und neue Perspektiven auf urbane Prozesse zu eröffnen. Vor allem qualitative Aspekte des städtischen Lebens, wie etwa das Nachbarschaftsgefühl, die subjektive Wahrnehmung des öffentlichen Raums oder auch der Erholungswert von Umgebungen, können dabei unberücksichtigt bleiben. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die systematische Auseinandersetzung mit relevanten digitaletischen Fragestellungen erforderlich, beispielsweise die Art der Einbindung von Menschen in algorithmische Entscheidungsprozesse oder die Gestaltung von vertrauenswürdiger KI (Blüml et al. 2025, S. 70 ff.).

4.3 Finanzielle Herausforderungen und mangelnder Nutznachweis

Da UDZ mit hohen initialen Investitionen sowie dauerhaft anfallenden Betriebs-, Wartungs- und Weiterentwicklungskosten verbunden sind, stellen Finanzierung und Folgekosten zentrale Herausforderungen für ihre Implementierung dar (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Insbesondere kleinere Kommunen verfügen oft über geringere finanzielle, personelle und technische Ressourcen als größere Gemeinden (Interview Seelig). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie UDZ so konzipiert und ausgestaltet werden können, dass sie sowohl in kleinen als auch größeren Kommunen Mehrwerte erzeugen können. Damit verbunden ist das Risiko einer ungleichen Verbreitung und Nutzung von UDZ, sofern deren Einsatz primär von der finanziellen Leistungsfähigkeit einzelner Kommunen abhängt.

Viele UDZ-Projekte entstehen bislang im Rahmen von öffentlichen Förderprogrammen (Kapitel 5.2). Oft führt die Befristung öffentlicher Mittel dazu, dass vor allem kurzfristig angelegte Demonstratoren oder Pilotprojekte mit Fachzwillingen umgesetzt werden. Die Ausgestaltung langfristig tragfähiger, skalierbarer und in den Verwaltungsalltag integrierbarer Lösungen steht noch aus (Blüml et al. 2025). Eine Finanzierung über das Ende des Förderzeitraums hinaus ist in der Regel nicht gesichert (DIN 2024; Richthofen et al. 2023). Vor diesem Hintergrund besteht Bedarf an neuen Finanzierungsmodellen und Anreizsystemen, um einen dauerhaften Betrieb und breite Umsetzung zu ermöglichen (Blüml et al. 2025).

Ein weiterer Engpass liegt im Bereich der Personalressourcen. Häufig fehlt es an speziell geschultem Personal, da die Konzeption, Umsetzung und der Betrieb von UDZ-Projekten vielfach zusätzlich zu den regulären Aufgaben der Verwaltungen erfolgt. Finanzielle Mittel sind daher nicht nur für die technische Infrastruktur, sondern ebenso für die Qualifizierung und den langfristigen Einsatz datenkompetenter Fachkräfte notwendig (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025).

Schließlich erschwert eine unzureichend entwickelte Wirkungsmessung die Legitimation von Investitionen. Es fehlen etablierte Metriken, um Effizienzgewinne und Wertschöpfungspotenziale digitaler Zwillinge systematisch zu erfassen (Marx/Seidel 2025). Eine umfassende Bewertung des Nutzens sowie die Hervorhebung von Synergien (beispielsweise die Mehrfachnutzung von Sensorinfrastrukturen für unterschiedliche Zwecke) könnten entscheidend dazu beitragen, die Akzeptanz auf politischer und administrativer Ebene zu erhöhen (Blüml et al. 2025).

5 Gelingensbedingungen

- Klare Governancestrukturen, insbesondere ein robustes Datengovernanceframework mit definierten Rollen, Verantwortlichkeiten und einer zentralen Koordinierungsstelle, sind unverzichtbar, um Datenqualität, Interoperabilität, rechtliche Vorgaben und die effektive Nutzung von UDZ in kommunalen Prozessen zu gewährleisten.
- Zwar existieren verschiedene Finanzierungsmodelle und Förderprogramme (öffentliche Subventionen, Public Private Partnerships, EU- und Bundesprogramme), aber die notwendige, langfristige Finanzierung für den Aufbau, Betrieb und die Weiterentwicklung von UDZ wird noch unzureichend unterstützt.
- Es bedarf klarer und konsistenter rechtlicher Rahmenbedingungen für UDZ, darunter Datenschutz- und Sicherheitsvorgaben, Haftungs- und Genehmigungsregelungen sowie verbindliche Standards und Interoperabilitätsanforderungen.
- Ethische Grundsätze, wie etwa Nicht-Diskriminierung, barrierefreie Zugänglichkeit, transparente Entscheidungsprozesse, verantwortungsbewusster Umgang mit Daten und die Vermeidung von Bias, müssen beachtet werden, um soziale Gerechtigkeit und Vertrauen zu sichern.

Für eine optimale Operationalisierung von UDZ im Kontext von städtischen Infrastrukturen sind umfassende Anwendungsleitlinien und klare rechtliche Rahmenbedingungen entscheidend (Blüml et al. 2025). Solche Governancestrukturen gehören neben den finanziellen und rechtlichen Rahmenbedingungen ebenso zu Gelingensbedingungen wie auch die Berücksichtigung ethischer Grundsätze.

5.1 Governancestrukturen

Datengovernance

Beim Betrieb von UDZ müssen vielfältige Anforderungen abgedeckt werden, die sich aus technologischen, planerischen, datenschutzrechtlichen und partizipativen Perspektiven ergeben. Zentrale und dezentrale Verantwortlichkeiten müssen dabei aufeinander abgestimmt werden.

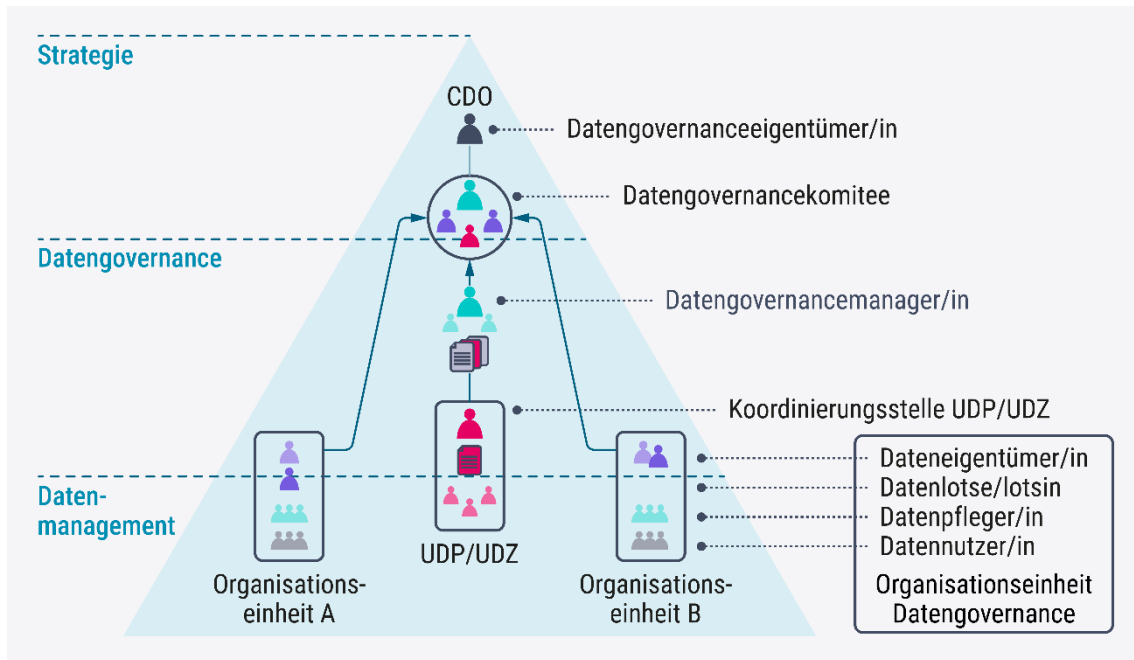
Für die Nutzung der einem UDZ zugrundeliegenden Datenbasis (Kapitel 2.2) wird in den DIN-Standards (2024) der Aufbau einer robusten und skalierbaren Datengovernancestruktur empfohlen, die klare Verantwortlichkeiten für Datenfreigabe, -verwaltung und -qualität definiert. Eine solche Struktur sollte darüber hinaus auch Regelungen zur Datensicherheit, zur regelmäßigen Datenaktualisierung, zur Qualitätssicherung sowie zur Archivierung von Daten umfassen (DIN 2024). Die Datengovernancestrukturen tragen dazu bei, Datensilos aufzubrechen, den Datenaustausch zwischen Fachbereichen und Institutionen zu fördern und eine stärkere Zentralisierung sowie Standardisierung von Datensätzen und Prozessen zu ermöglichen (Blüml et al. 2025). Praxisbezogene Orientierung hierbei bieten unter anderem der Data-Governancewegweiser für Smart Cities oder das Smart District Data Infrastructure, die Kommunen bei der konzeptionellen Ausgestaltung und operativen Umsetzung der für sie geeigneten Datengovernancemodelle unterstützen (Blüml et al. 2025; Richthofen et al. 2023).

Die Implementierung einer solchen Datengovernancestruktur erfordert Anpassungen in den bestehenden Verwaltungsstrukturen, insbesondere im Rahmen der Definition klar definierter Rollen und Zuständigkeiten (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025).

Zur Ausgestaltung der Datengovernance kann ein Rollenmodell mit verschiedenen Verantwortungsebenen beitragen (Abbildung 5.1), das an die jeweiligen kommunalen Strukturen angepasst werden kann (CUT 2023, S. 3). Auf den obersten Ebenen wird ein strategischer Rahmen durch ein/e Datengovernanceeigentümer/in gesetzt, während auf der operativen Ebene die Rolle des/der Datengovernancemanager/in die Übersetzung in verbindliche Regelwerke koordiniert. Ergänzend ist zwischen zentralen und dezentralen Zuständigkeiten zu unterscheiden. Eine zentrale Koordinierungsstelle UDZ kann hierbei insbesondere Aufgaben der technischen Interoperabilität und das Plattformmanagement übernehmen. Weitere, dezentrale Rollen – etwa Dateneigentümer/in, Datenlotse/in und Datenpfleger/in – sind für die konkrete Umsetzung der Datengovernance in den jeweiligen Fach- und Organisationseinheiten verantwortlich.

Es wird weiterhin empfohlen, eine zentrale Koordinierungsstelle sowie die dezentralen Verantwortlichen in einem sogenannten Datengovernance-Komitee zu verankern, das eine konsistente, transparente und effiziente Datenstrategie für die gesamte Kommune gewährleisten soll (CUT 2023, S. 6 f.).

Abbildung 5.1 Rollenmodell mit unterschiedlichen Verantwortungsebenen



Quelle: nach CUT (2023, S. 7)

Ein zentrales Erfordernis besteht grundsätzlich darin, ein gemeinsames Verständnis aller beteiligten kommunalen Akteure hinsichtlich des Konzepts „Digitaler Zwilling“ und der damit verbundenen Datenplattformen und Schnittstellen zu schaffen (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Fehlende begriffliche und konzeptionelle Klarheit kann zu divergierenden Zielvorstellungen und zu Verzögerungen in der Projektumsetzung führen. Vor diesem Hintergrund sollten Ziele, Nutzungsszenarien sowie konkrete Anwendungsfälle frühzeitig definiert und abgestimmt werden (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025). Erforderlich ist dabei eine klare Abgrenzung zu verwandten Konzepten wie BIM, GIS oder CAD, um die spezifischen Potenziale digitaler Zwillinge hervorzuheben (Blüml et al. 2025). Um ferner den Mehrwert von Udz für unterschiedliche Zielgruppen aufzuzeigen und organisatorische Unterstützung zu gewinnen, empfiehlt sich ein stufenweises Vorgehen, das mit risikoarmen Pilotprojekten beginnt. Udz sollten dabei als modulare Integrationsplattformen konzipiert werden, die sukzessive erweitert und an neue Anforderungen angepasst werden können (BBSR 2023a).

Für die Akzeptanz und den Erfolg von Udz ist zudem die frühzeitige Einbindung relevanter Fachabteilungen (zum Beispiel Stadtplanung, Verkehrsplanung, Umweltamt) und Stakeholder (zum Beispiel Bürger/innen, Unternehmen, Forschungseinrichtungen) ratsam (Blüml et al. 2025; Wangermann 2024). Interkommunale Kooperationen und Entwicklungsgemeinschaften bieten darüber hinaus die Möglichkeit, Synergien zu nutzen, neue Technologien gemeinsam zu integrieren und von den Erfahrungen anderer Kommunen zu profitieren.

Schließlich setzt der Einsatz von Udz in der öffentlichen Verwaltung den gezielten Aufbau digitaler Kompetenzen voraus (Blüml et al. 2025; Richthofen et al. 2023). Erforderlich sind etwa Schulungen zur Stärkung der Data Literacy, die ein grundlegendes Verständnis für Datenqualität, Analyseverfahren, Interpretationsspielräume und datenschutzrechtliche Anforderungen vermitteln. Der Aufbau digitaler Kompetenzen kann dabei voraussichtlich nicht allein durch Fortbildungen erfolgen, sondern wird in vielen Fällen auch einen zusätzlichen Personalaufbau erfordern, der wiederum mit zusätzlichen finanziellen Ressourcen verbunden ist (Kapitel 4.2).

Beteiligungsmöglichkeiten

Udz ermöglichen es, komplexe städtische Zusammenhänge in vereinfachter Form darzustellen, beispielsweise als dreidimensionale Stadtmodelle oder über simulationsbasierte Visualisierungen, die Auswirkungen von Klimaanpassungsstrategien aufzeigen (Kapitel 2.3). Dadurch können potenzielle Auswirkungen planerischer Entscheidungen für konkret betroffene Personengruppen sichtbar gemacht werden, sodass Bürger/innen die für sie relevanten Konsequenzen besser nachvollziehen können.

Gleichzeitig eröffnen UDZ neue Möglichkeiten der aktiven Beteiligung, indem Bürger/innen auf verschiedene Weise mit dem UDZ interagieren können, etwa indem sie Planungsvorschläge kommentieren, Feedback zu Benutzerschnittstellen geben oder freiwillig eigene Daten spenden. Dieses Zusammenspiel aus erhöhter Transparenz und erweiterten Beteiligungsmöglichkeiten kann das Vertrauen in kommunale Entscheidungsprozesse stärken sowie Wohlbefinden und Lebensqualität erhöhen (Interview Kringer; Marx/Seidel 2025, S. 3; Richthofen et al. 2023, S. 9).

Anwendungsbeispiele verdeutlichen das Potenzial der partizipativen Ansätze: Beispielsweise lassen sich bei der Planung von Maßnahmen zur Minderung von Hitzeinseln in dicht bebauten Stadtquartieren mit Hilfe eines UDZ verschiedene Szenarien visualisieren, etwa zu Baumbepflanzungen, Fassadenbegrünungen oder Flächenentsiegelungen. Anwohner/innen können so nachvollziehen, wie sich die geplanten Maßnahmen auf die lokalen Temperaturen auswirken, und Feedback zu konkreten Gestaltungsvorschlägen geben. Zusätzlich können Bürger/innen selbst Daten, etwa zur Luftqualität, zum Mobilitätsverhalten oder zum Hitzeempfinden, sammeln und in den UDZ einspeisen. Diese zusätzlichen Daten können von den Stadtplaner/innen ausgewertet und bei der weiteren Umsetzung der Maßnahmen berücksichtigt werden.

Darüber hinaus stellen die Beteiligung an der Entwicklung eines UDZ und Interaktion der Stadtgesellschaft mit einem UDZ selbst einen wesentlichen Erfolgsfaktor für dessen Akzeptanz und Erfolg dar. Für eine erfolgreiche Implementierung besteht eine Voraussetzung darin, dass Bürger/innen sich in Beteiligungsformaten einbringen können oder der Nutzung ihrer Daten für die Verwendung in UDZ zustimmen. Es bedarf daher einer transparenten Kommunikation über Nutzen, Zweck und Risiken bei der Anwendung von UDZ schon während der Implementierungsphase, um Vorbehalte gegenüber den UDZ auszuräumen.

5.2 Finanzielle Rahmenbedingungen

Finanzierungsmodelle

Die erfolgreiche Umsetzung von UDZ ist von langfristig tragfähigen Finanzierungsmodellen abhängig (Kapitel 4.3). Neben der initialen Projektfinanzierung müssen dabei insbesondere die dauerhaft anfallenden Betriebs-, Wartungs- und Weiterentwicklungskosten berücksichtigt werden.

Grundsätzlich kommen verschiedene Finanzierungsmodelle infrage. Eine Subventionierung ist insbesondere dann erforderlich, wenn der UDZ oder die zugehörige Datenplattform kostenfrei für die Nutzer/innen zur Verfügung gestellt werden sollen (BBSR 2023b). Alternativ können kostendeckende oder gewinnorientierte Modelle verfolgt werden, bei denen entweder einzelne Funktionalitäten oder die gesamte Nutzung der gesamten Datenplattform gegen Entgelt angeboten werden (etwa im Rahmen von Software-as-a-Service-Modellen). Ziel solcher Ansätze ist es, die laufenden Betriebskosten zu decken und gegebenenfalls Überschüsse für Reinvestitionen zu erwirtschaften (BBSR 2023a, 2023b, S. 15). Ergänzend kann die Einbindung von Sponsoren oder Gewerbetreibenden zusätzliche Finanzierungsbeiträge leisten (BBSR 2023a, 2023b).

Art und Umfang der Finanzierung unterscheiden sich zwischen den Kommunen erheblich. Nur wenigen Kommunen gelingt eine vollständige Finanzierung aus Eigenmitteln (Richthofen et al. 2023).

Darüber hinaus wird auch eine Finanzierung durch Industrie oder Wirtschaft als Option diskutiert, wenngleich entsprechende Public-Private-Partnership-Modelle in diesem Bereich bislang noch selten sind.

Ein Potenzial zur Kostensenkung liegt in der interkommunalen Zusammenarbeit. Durch gemeinsame Entwicklungs- und Betriebsgemeinschaften können Ressourcen gebündelt, Lizenzkosten reduziert und Synergien bei Vertragsverhandlungen mit Dienstleistern erzielt werden. Gleichzeitig trägt diese Form der Kooperation zum Aufbau interkommunaler Kompetenzen und Strukturen bei (BBSR 2023a; Blüml et al. 2025).

Unabhängig von den gewählten Finanzierungsmodellen empfiehlt sich die Durchführung von Kosten/Nutzen-Analysen, um eine dauerhafte und finanziell tragfähige Implementierung von UDZ zu ermöglichen. Dabei sollte insbesondere geprüft werden, ob und in welcher Form UDZ messbare Mehrwerte für eine ökonomisch nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung schaffen (DIN 2024, S. 123 ff.). Die praktische Umsetzung solcher Analysen ist derzeit jedoch noch erschwert, da es an etablierten Metriken und standardisierten Evaluationsverfahren mangelt (Kapitel 4.3).

Förderprogramme

Ein bedeutender Teil der in Deutschland realisierten UDZ wurde bislang durch staatliche Förderprogramme unterstützt. Lediglich in einigen wenigen Städten existieren Fachzwillinge (zum Beispiel zu den Themen Verkehr oder Starkregen), die vollständig aus kommunalen Eigenmitteln finanziert wurden.

In Deutschland erfolgt die Förderung bislang nicht über ein eigenständiges Bundesförderprogramm, das ausschließlich UDZ adressiert. Stattdessen werden UDZ und ihre zentralen Komponenten im Rahmen mehrerer Förderprogramme und teils indirekt adressiert, etwa durch die Förderung urbaner Datenplattformen, digitaler Stadtmodelle oder simulationsbasierter Planungsinstrumente. Häufig sind diese Bausteine in übergeordnete Smart-City-Strategien eingebettet und werden dort als Querschnittselemente einer digitalen Stadtentwicklung verortet.

Zu den einschlägigen Bundesförderprogrammen zählt das vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) initiierte Programm „Smart Cities made in Germany“¹³, das seit 2019 insgesamt 73 Modellprojekte in Modellregionen fördert. Ergänzt wird es durch den „Stufenplan Smarte Städte und Regionen“, der einen strategischen Rahmen für die Digitalisierung der Stadt- und Regionalentwicklung bildet und in dem auch UDZ als Baustein verortet sind (BMWSB 2024).

Ebenfalls relevant ist das vom Bundesministerium für Verkehr geförderte Programm „Daten.Plus“¹⁴ (vormals „mFUND“). Über die zugehörige Datenplattform „Mobilithek“¹⁵ werden Mobilitäts-, Geo- und Wetterdaten zentral bereitgestellt, die insbesondere in den Bereichen Mobilität, Umwelt und Klimaanpassung als Datengrundlage für UDZ genutzt werden können.

Einen spezifischen Beitrag zur praktischen Umsetzung von UDZ leistete zudem das vom BMWSB zwischen 2021 und 2025 geförderte Kooperationsprojekt „Connected Urban Twins“ (CUT)¹⁶ der Städte Hamburg, Leipzig und München, das mit 21 Mio. Euro Bundesmitteln und zusätzlichen 11 Mio. Euro der drei Partnerstädte finanziert wurde (Blüml et al. 2025; Schubbe et al. 2023). Ziel des Projekts war es, die Entwicklung urbaner Datenplattformen und digitaler Zwillinge voranzutreiben und konkrete Anwendungsfälle in der kommunalen Praxis zu erproben. Im Rahmen des CUT-Projekts wurde in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern auch die Norm „DIN SPEC 91607: Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen“ erarbeitet (DIN 2024) (Kapitel 2.1).

Ergänzend zu den Bundesprogrammen existieren Förderaktivitäten auf Landesebene. So unterstützte das Bayerische Staatsministerium für Digitales im Rahmen des Programms „TwinBy – Digitale Zwillinge für Bayern“ zwischen 2022 und 2024 insgesamt 17 kommunale Vorhaben beim Aufbau digitaler Zwillinge.

Darüber hinaus gibt es verschiedene EU-Förderprogramme, die entweder direkt oder indirekt zentrale Bausteine für die Entwicklung von UDZ adressieren. Zu nennen ist hier beispielsweise die im Rahmen von Horizon Europe geförderte Mission „Climate-Neutral and Smart Cities“, die das Ziel hat, bis 2030 112 ausgewählte Städte in Europa klimaneutral zu gestalten und mit geeigneten digitalen Instrumenten auszustatten. Als Teil dieser Mission werden verschiedene Vorhaben gefördert, wie beispielsweise das HARMONIE-Projekt, das digitale Zwillinge zur Reduktion von Luftverschmutzung in Städten und zur Förderung der öffentlichen Gesundheit entwickelt (Fernandez 2025; MPIC 2025), oder das Projekt „NexTCity“ zur Reduzierung von CO₂ in Lissabon (EK o. J.).

Weiterhin werden im Rahmen des Digital-Europe-Programms Vorhaben wie beispielsweise „Towards networked Local Digital Twins in the EU“ (EK 2024) gefördert, in dem unter anderem ein Augenmerk auf die Vernetzung digitaler Zwillinge verschiedener Städte gelegt wird.

Auch auf anderen Wegen unterstützt die EU die (Weiter-)Entwicklung von UDZ, beispielsweise durch das Konsortium für eine europäische digitale Infrastruktur, das dazu beitragen soll, die Ziele der „Europe’s Digital Decade“ (EK o. J.) zu erreichen. Die in diesem Rahmen geförderte Initiative „CitiVERSE“ soll dazu bestehende UDZ in Europa miteinander verbinden (GD Connect o. J.).

5.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung von UDZ sind klare und konsistente rechtliche Rahmenbedingungen. Ein zentraler Aspekt betrifft dabei sowohl die Regelung von Zugriffsrechten auf Daten als

¹³ <https://www.smart-city-dialog.de/ueber-uns/modellprojekte-smart-cities> (21.4.2026)

¹⁴ <https://daten.plus/> (21.4.2026)

¹⁵ <https://mobilithek.info/> (21.4.2026)

¹⁶ <https://www.connectedurbantwins.de/> (21.4.2026)

auch bestehende und zukünftige Verpflichtungen, Daten bereitzustellen. Für beide Bereiche besteht ein erheblicher Bedarf an eindeutigen Vorgaben, um Rechtssicherheit für alle beteiligten Akteure zu schaffen (Blüml et al. 2025). Auf Bundesebene regelt das E-Government-Gesetz¹⁷ die Bereitstellung offener Verwaltungsdaten, während das Datennutzungsgesetz¹⁸ die Verwendung öffentlich finanzierter Daten definiert. Die Herausforderung besteht dabei, diese bestehenden Regelungen auf die neuen datenintensiven und simulationsbasierten Anwendungen zu übertragen.

Ein weiterer rechtlich relevanter Aspekt betrifft die Nachvollziehbarkeit verwendeter Datenquellen, Metadaten, Modelle und Softwarekomponenten, insbesondere dann, wenn Simulationsergebnisse als Grundlage für administrative oder politische Entscheidungen herangezogen werden. Daher sind eine revisionssichere (also manipulationsfreie) Protokollierung sowie die rechtlich verbindliche Signatur von Ergebnissen wesentliche Voraussetzungen für den zuverlässigen Einsatz von UDZ in Verwaltungsprozessen (DIN 2024). Hier können Ansätze und Verfahren aus dem Building Information Modeling (BIM), etwa zur Versionierung, Dokumentation und Freigabe von Modellen, als Vorbild dienen, die sich auf UDZ übertragen lassen. Ergänzend zu den formalen Regelungen können Anlaufstellen und Netzwerke, wie beispielsweise die CUT-Akademie,¹⁹ Kommunen Hilfestellungen zu Daten Zugangsregelungen bereitstellen und diese bei der Umsetzung von Rechtsvorschriften unterstützen (Blüml et al. 2025).

Sensible Daten in UDZ stellen zudem besondere Anforderungen an Sicherheitsstandards. Die Implementierung von Standards wie DIN EN ISO/IEC 27001 (DIN 2024), das NIST Cybersecurity Framework²⁰ oder OAuth²¹ können dabei helfen, Daten vor unbefugtem Zugriff und Manipulation zu schützen. Insbesondere bei Daten kritischer Infrastrukturen ist die Einhaltung der entsprechenden rechtlichen Vorgaben besonders relevant. Allerdings erschweren variierende Regelungen auf Landes- und kommunaler Ebene eine einheitliche Umsetzung (Blüml et al. 2025). Auf europäischer Ebene schafft die Richtlinie 2007/2/EG²² rechtliche Grundlagen für die Bereitstellung und Nutzung öffentlicher Geodaten.

Ein weiterer zentraler rechtlicher Bereich betrifft datenschutzrechtliche Anforderungen. Die Einhaltung der Verordnung (EU) 2016/679²³, des Bundesdatenschutzgesetzes²⁴ sowie länderspezifischer Regelungen stellt eine wesentliche Rahmenbedingung für die Entwicklung und Nutzung von UDZ dar (Schubbe et al. 2023). In diesem Zusammenhang ist zu regeln, welche Daten bei der Entwicklung und Nutzung von UDZ erhoben und verarbeitet werden dürfen, wie mit personenbezogenen Daten umzugehen ist und wie die Nachvollziehbarkeit von Systemzugriffen gewährleistet wird (BBSR 2023a).

Aufgrund der Komplexität von UDZ und der Vielzahl potenziell verknüpfter Datenquellen ist die Anonymisierung häufig eine erhebliche Herausforderung, beispielsweise bei der Erfassung von Mobilitätsdaten über Standortinformationen von Mobiltelefonen. In der kommunalen Praxis werden die datenschutzrechtlichen Auflagen daher häufig als Hürde wahrgenommen. Das kann dazu führen, dass bereits hinreichend anonymisierte und aggregierte Daten nicht freigegeben werden (Interview Stubert).

Auf kommunaler Ebene besteht vielfach noch Unsicherheit darüber, welche Daten wie geteilt werden dürfen. Vor diesem Hintergrund äußerten die befragten Expert/innen den Wunsch nach einer stärkeren Anpassung der datenschutzrechtlichen Anforderungen an die sich dynamisch und rasch entwickelnden Technologien. Rechtliche Unklarheiten sollten aufgelöst und vermeidbare Einschränkungen minimiert werden (Interview Kringer). Dies betrifft nicht nur den Datenschutz, sondern auch langwierige Vergabe- und Genehmigungsverfahren für Soft- und Hardwarelösungen in Kommunen. Überdies bestehen weiterhin offene rechtliche Fragen zur Haftung, insbesondere mit Blick auf Fehlentscheidungen, die auf fehlerhaften Daten oder Analysen beruhen (Blüml et al. 2025). Als möglicher Lösungsansatz wird ein Transparenzgesetz diskutiert, das einen einheitlichen Standard für Datennutzung und -transfer in deutschen Kommunen schaffen und zur Erleichterung der Umsetzung beitragen könnte (Interview Anonym).

¹⁷ E-Government-Gesetz vom 25. Juli 2013, zuletzt am 2. Dezember 2025 geändert

¹⁸ Datennutzungsgesetz vom 16. Juli 2021

¹⁹ <https://www.connectedurbantwins.de/wissenstransfer/cut-akademie/> (21.4.2026)

²⁰ <https://www.nist.gov/cyberframework> (21.4.2026)

²¹ <https://oauth.net/2/> (21.4.2026)

²² Richtlinie 2007/2/EG vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE)

²³ Verordnung (EU) 2016/679 vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung)

²⁴ Bundesdatenschutzgesetz vom 30. Juni 2017, zuletzt am 6. Mai 2024 geändert

5.4 Ethische Grundsätze

Um die Potenziale von UDZ für eine integrierte, nachhaltige Stadtentwicklung zu heben, kommt der Berücksichtigung ethischer Grundsätze bei der Entwicklung und Anwendung sowie der Schaffung von Beteiligungsmöglichkeiten für Bürger/innen eine erhebliche Bedeutung zu.

Ein wesentlicher ethischer Grundsatz ist die Vermeidung von Benachteiligungen einzelner Personen oder Personengruppen infolge datenbasierter Analysen und Entscheidungsprozesse. Dieser Anspruch leitet sich aus den Prinzipien der Antidiskriminierung und Fairness ab. Dies erfordert unter anderem, Datenbestände, Modelle und Auswertungen so zu gestalten, dass unterschiedliche Bedürfnisse und Lebenslagen angemessen berücksichtigt werden. Dazu zählt etwa die Berücksichtigung von Daten zu Menschen mit körperlichen Einschränkungen, um planerische Entscheidungen nicht einseitig zu treffen (Blüml et al. 2025, S. 72; DIN 2024, S. 119). Welche Aspekte potenzieller Benachteiligung relevant sind, hängt maßgeblich vom Anwendungsfall ab. Entsprechend müssen ethische Anforderungen bei der Gestaltung digitaler Zwillinge angemessen Berücksichtigung finden, um sicherzustellen, dass UDZ nicht unbeabsichtigt soziale Ungleichheiten reproduzieren oder verstärken (Blüml et al. 2025, S. 74).

Zudem ist bei der Gestaltung von Benutzeroberflächen und Schnittstellen zu berücksichtigen, dass Nutzer/innen über sehr unterschiedlich ausgeprägte digitale Kompetenzen verfügen. UDZ sollten daher so konzipiert sein, dass sie auch von Personen mit geringen digitalen Fähigkeiten genutzt werden können (Interview Kringer). Anderenfalls besteht das Risiko einer Ausgrenzung einzelner gesellschaftlicher Gruppen, insbesondere von Personen ohne oder mit nur eingeschränktem Zugang zu digitalen Endgeräten oder mit gering ausgeprägter Digitalkompetenz (Fokusgruppe; Argota Sánchez-Vaquerizo 2025, S. 15; Sahr et al. 2023, S. 16).

Außerdem erwarten Nutzer/innen und potenziell Betroffene, über Funktionsweise, Einsatzbereiche und mögliche Risiken von UDZ verständlich informiert zu werden und ihre Rechte gegenüber der verantwortlichen Stelle wahrnehmen zu können (Fokusgruppe). Dies setzt voraus, dass den Anwender/innen geeignete Kontroll- und Einflussmöglichkeiten eingeräumt werden, etwa in Bezug auf die Nutzung ihrer Daten oder die Nachvollziehbarkeit der getroffenen Entscheidungen (Blüml et al. 2025, S. 73). Auch Art und Weise der Informationsvermittlung spielen hierbei eine wichtige Rolle. Potenzielle Nutzer/innen und Betroffene fordern eine möglichst vielfältige und zielgruppengerechte Kommunikation ein, die über klassische Informationsveranstaltungen oder rein digitale Angebote hinausgeht. Ergänzend sind niedrigschwellige und teilweise auch individuellere Formen der Ansprache erforderlich, um die unterschiedlichen Informationsbedarfe angemessen zu adressieren (Fokusgruppe).

Damit Betroffene die Entscheidungen von UDZ nachvollziehen können, kommt der transparenten und nachvollziehbaren Gestaltung algorithmischer Systeme und Datenverarbeitungsprozesse, die Grundlage von UDZ sind, eine große Bedeutung zu. Dabei ist jedoch hinsichtlich unterschiedlicher Betroffenenengruppen zu differenzieren, denn deren Informations- und Transparenzbedarfe können sehr verschieden sein (Blüml et al. 2025, S. 73). Beispielsweise könnte mit UDZ simuliert werden, inwieweit einzelne Stadtviertel unterschiedlich von Hitze betroffen sind und welche Maßnahmen, zum Beispiel die Umleitung von Verkehr, hier entlastend umgesetzt werden können. Aus Verwaltungsperspektive ist es dann erforderlich, nachvollziehen zu können, wie die Gewichtung von Maßnahmen zustande kommt, während Bewohner/innen der betroffenen Stadtviertel daran interessiert sind, welche konkreten Auswirkungen die Maßnahmen vor Ort haben werden.

Unabhängig vom Datenschutz können bei Bürger/innen Sorgen entstehen, dass mit ihren persönlichen Daten sorglos umgegangen wird. Die generellen Risiken, die bei der Verwendung von Daten durch Cyberangriffe, Datenmissbrauch und -manipulation etc. entstehen können, gelten auch für Daten, die von UDZ verarbeitet werden. Auch die Verletzung von Privatsphäre durch Datenerhebungs- und -verarbeitungsprozesse von UDZ, wie etwa die Erfassung von Daten im öffentlichen Raum sowie deren Vernetzung und Verarbeitung auf einer urbanen Datenplattform, ist eine Sorge, die bei Bürger/innen entstehen kann. Insofern kommt einem angemessenen Risikomanagement, einschließlich einer differenzierten Risikokommunikation, eine große Bedeutung zu, um Vertrauen und Akzeptanz in UDZ zu schaffen (Sahr et al. 2023, S. 10).

Schließlich besteht das Risiko, dass die in UDZ verwendeten Daten gesellschaftliche Gruppen und Lebensrealitäten nicht ausreichend repräsentieren. In die Entwicklung und die Anwendung von UDZ fließt eine Vielzahl heterogener Daten aus zahlreichen Quellen ein (Kapitel 2.2). Gleichwohl bleibt fraglich, inwieweit dabei auch schwer messbare, qualitative Aspekte städtischer Lebensumgebungen adäquat abgebildet werden können. Dies spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn marginalisierte Bevölkerungsgruppen oder weniger digitalisierte Bereiche städtischen Lebens nur unzureichend berücksichtigt sind (Interviews Anonym, Füller; Marx/Seidel 2025, S. 2). Wenn digitale Zwillinge kein vollständiges Abbild liefern können, wenn also beispielsweise Informationen

über die Lebensqualität einzelner Stadtviertel aus Sicht der dortigen Bevölkerung fehlen oder verzerrt sind, dann besteht die Gefahr, dass bestehende soziale Ungleichheiten weiter vertieft (Marx/Seidel 2025, S. 3) oder neue Formen von Exklusion erzeugt werden (Argota Sánchez-Vaquerizo 2025, S. 15; DIN 2024, S. 10). Dies könnte der Fall sein, wenn ein sozial benachteiligtes Quartier nur unzureichend in einem UDZ abgebildet werden kann, weil beispielsweise die erforderliche Sensorinfrastruktur vor Ort fehlt oder weil die Bevölkerung nur eine niedrig ausgeprägte digitale Ausstattung mit Endgeräten aufweist. In einem solchen Fall, etwa wenn Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebelastung umgesetzt werden sollen, könnte der UDZ bevorzugt Handlungsoptionen für jene Stadtviertel vorschlagen, die datenmäßig vollständiger im UDZ abgebildet sind.

6 Urbane digitale Zwillinge im Jahr 2035: drei Szenarien zur künftigen Verbreitung

- Durch eine systematische Analyse von 37 Einflussfaktoren und auf Basis einer Wechselwirkungsanalyse wurden im vorliegenden Bericht drei plausible Szenarien für das Jahr 2035 entworfen.
- Szenario 1 schildert eine mögliche zukünftige Entwicklung, in der UDZ flächendeckend in allen Kommunen verankert sowie gesetzlich vorgeschrieben sind und finanziell unterstützt werden, sodass daten- und KI-gestützte Planungsprozesse umfassende Klimaanpassungs- und Nachhaltigkeitsmaßnahmen ermöglichen und zugleich aktiv Bürgerbeteiligung sowie offene Datenökosysteme fördern.
- Szenario 2 skizziert eine weitere, alternativ mögliche Entwicklung, in der UDZ nur sporadisch und fragmentiert in einzelnen Städten eingesetzt werden, finanzielle und institutionelle Hürden zu unzureichender Skalierung führen und dadurch viele Chancen für wirksame Klimaanpassung und nachhaltige Stadtentwicklung verpasst bleiben.
- Szenario 3 beschreibt schließlich eine dritte mögliche Entwicklung, in der UDZ kaum über einzelne Pilotprojekte hinaus genutzt werden, weil fehlende Finanzierung, schwacher politischer Wille und mangelnde Integration zu einer reaktiven, fragmentierten Stadtentwicklung führen, bei der Klimarisiken nur punktuell und ohne langfristige, datengestützte Maßnahmen adressiert werden.

Gegenwärtig zeichnen sich unterschiedliche zukünftige Entwicklungspfade für die weitere Entwicklung von UDZ ab. Während sich zahlreiche Projekte in der Implementierungsphase befinden, ist vor allem die langfristige Finanzierung ungelöst. Damit verbunden sind weiterhin grundlegende Unsicherheiten, etwa hinsichtlich des konkreten Mehrwerts von UDZ für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung. Zudem liegen bislang nur begrenzte Erfahrungswerte zur langfristigen Nutzung von UDZ in der kommunalen Praxis vor.

Vor diesem Hintergrund wird in den folgenden Szenarien ein Blick auf unterschiedliche mögliche Zukunftsentwicklungen geworfen, wie sich die Nutzung von UDZ ausprägen könnte. Die Szenarien bieten damit erste Anhaltspunkte für die Ableitung von möglichen, bereits heute bestehenden Gestaltungsoptionen. Die drei Szenarien basieren auf sieben Schlüsselfaktoren, deren unterschiedliche Ausprägungen als alternative Projektionen zukünftiger Entwicklungspfade dargestellt werden.

6.1 Entwicklung der Szenarien

Vom Einflussfaktor zum Schlüsselfaktor

Ausgangspunkt für die Entwicklung plausibler Szenarien ist die Ableitung von Einflussfaktoren (Kosow/Gaßner 2008), also jenen Faktoren, die die Entwicklung von UDZ prägen können, indem sie diese bremsen oder beschleunigen. Einflussfaktoren lassen sich aus verschiedenen Quellen ableiten, etwa aus der analysierten Literatur sowie den geführten Interviews. Für die künftige Entwicklung von UDZ wurden so 37 Einflussfaktoren identifiziert, die nach dem STEEP+VL-Raster²⁵ systematisiert worden sind, also unterteilt in soziale, technologische, wirtschaftliche (E = economy), ökologische (E = ecology) und politische Faktoren, ergänzt um Werte (V = Values) und rechtliche Rahmenbedingungen (L = Legal).

Um hieraus Schlüsselfaktoren ableiten zu können, ist die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den Faktoren wichtig. Hierzu nutzt man Wechselwirkungsanalysen, um sämtliche Faktoren zueinander in Beziehung zu setzen und die Stärke dieser Beziehung (von gar keinem Einfluss aufeinander bis zu einem sehr starken Einfluss) zu ermitteln (Fink/Siebe 2016; Godet 2009). Im Ergebnis dieses Analyseschrittes entsteht eine Matrix, die Faktoren nach ihrem Einfluss – ihrer Aktivsumme – auf alle anderen Faktoren sowie ihrem Grad der Beeinflussung – ihrer Passivsumme – sortiert. Besonders aktive Faktoren können als starke Hebel betrachtet werden, die viele andere Faktoren stark beeinflussen können. Besonders passive Faktoren sind eher träge Kräfte, die zwar von einer Vielzahl anderer Faktoren stark beeinflusst werden, selbst jedoch kaum andere Faktoren prägen. Diejenigen Faktoren, die gleichzeitig sehr aktiv sind und viele andere Faktoren beeinflussen, allerdings kaum ihrerseits beeinflusst werden, können als Schlüsselfaktoren bezeichnet werden (Kosow/Gaßner 2008).

Auf Basis der Wechselwirkungsanalyse wurden sieben Schlüsselfaktoren ausgewählt.

²⁵ Es gibt unterschiedliche Systematisierungen: STEEP, PESTL, STEEP+VL (siehe auch ISI 2015, S. 26).

Tabelle 6.1 **Schlüsselfaktoren für die künftige Entwicklung urbaner digitaler Zwillinge**

soziale Faktoren	Bewusstsein für Klimarisiken
technologische Faktoren	Simulationsmodelle für Extremwetterereignisse und Klimaanpassungsplanung, Verfügbarkeit von sensorbasierten Umwelt- und Klimadaten
ökonomische Faktoren	Kosten und Investitionen für Klimaanpassungsmaßnahmen
ökologische Faktoren	Monitoring von Emissionen und Anpassungsmaßnahmen
politisch-regulatorische Faktoren	Klimaanpassungsstrategien auf Bundes-/Landesebene Verpflichtung zur Klimaanpassung auf kommunaler Ebene

Eigene Zusammenstellung

Vom Schlüsselfaktor zur Projektion

Die Schlüsselfaktoren sind richtungsneutral formuliert, das heißt, sie enthalten keine Annahmen über ihre zukünftige Entwicklung. Erst durch die Festlegung einer möglichen Entwicklungsrichtung entstehen sogenannte Projektionen (Fink/Siebe 2016; Pillkahn 2007). Ein Schlüsselfaktor kann dabei unterschiedliche zukünftige Ausprägungen annehmen. Das Bewusstsein für Klimarisiken in der Gesellschaft kann beispielsweise zunehmen, gleichbleiben oder abnehmen. Für alle sieben Schlüsselfaktoren wurden jeweils drei mögliche Ausprägungen formuliert. Dabei wurde die Anzahl bewusst begrenzt, um die Komplexität des Szenarioprozesses in einem handhabbaren Rahmen zu halten.

Von der Projektion zum Szenario

Die entwickelten Projektionen wurden im nächsten Schritt miteinander in Beziehung gesetzt. Ziel war es zu prüfen, welche Kombinationen von Projektionen in sich stimmig sind und sich widerspruchsfrei miteinander verbinden lassen (Fink/Siebe 2016; Pillkahn 2007). Auf dieser Grundlage wurden drei plausible und jeweils in sich konsistente Projektionskombinationen identifiziert. Diese unterscheiden sich deutlich voneinander und eröffnen alternative Entwicklungspfade. Sie können als Rohszenarien bezeichnet werden, also als erste verdichtete Entwürfe möglicher Zukunftsbilder. Anschließend wurden die drei Rohszenarien zu ausführlichen Szenarien weiter ausgearbeitet und narrativ beschrieben. Die entstandenen Szenarien zeigen unterschiedliche, plausible Entwicklungsmöglichkeiten auf, wie sich Städte unter der Verwendung von UDZ nachhaltig und an den Klimawandel angepasst entwickeln können. Jedes Szenario umfasst:

- wesentliche technologische Merkmale von UDZ,
- prägende gesellschaftliche Entwicklungen,
- relevante politische Rahmenbedingungen und Strategien,
- die Rolle von Kommunen bei der Anpassung an den Klimawandel,
- Finanzierungsmodelle für UDZ und Finanzierungsbedarfe für Klimaanpassungsmaßnahmen,
- die Ausprägung der notwendigen Dateninfrastruktur und
- den Grad der Entwicklung von deskriptiven Planungsinstrumenten bis zu autonomen Entscheidungssystemen.

6.2 Szenario 1: Nachhaltige und an den Klimawandel angepasste Städte

Robuste Hightech: Sensorik zur flächendeckenden Zustandsermittlung

2035 sind UDZ in deutschen Städten weit verbreitet. Ein wesentlicher Baustein dieser Systeme sind umfassende, resilient gestaltete Netzwerke aus Sensoren, die verschiedene Variablen kontinuierlich messen, wie CO₂-Emissionen, (Verkehrs-)Lärm, Strom- und Wärmeverbrauch, Biodiversität, Luftqualität etc. Anhand dieser Messungen lässt sich ein detailliertes digitales Abbild einer städtischen Umgebung erzeugen.

Durch Simulationen lässt sich ermitteln, welche Wirkungen durch verschiedene Maßnahmen erzielt werden können. Quasi in Echtzeit können so die wirkungsvollsten Maßnahmen, teilweise agentenbasiert, umgesetzt werden.

Partizipation und Nachhaltigkeit: die moderne Gesellschaft der 2030er Jahre

Im Jahr 2035 leiden die Bewohner/innen zahlreicher Städte in Deutschland unter den Folgen des Klimawandels. Nicht nur extreme Hitzewellen, Starkregenereignisse und Überschwemmungen, sondern auch Waldbrände und Dürren sowie Stürme beeinflussen das alltägliche Leben in Großstädten. Stromausfälle, Wasserknappheit sowie Verkehrsbeeinträchtigungen gehören seit Jahren zur Lebensrealität zahlreicher Menschen.

Die Folgen des Klimawandels sind daher einem großen Teil der Bevölkerung bewusst, einerseits durch persönliche Betroffenheit und andererseits durch vielfältige Bildungsangebote, die mithilfe digitaler Zwillinge die Auswirkungen realitätsnah erfahrbar machen. Zum Einsatz kommen hierzu virtuelle und augmentierte Realitäten, die durch Computersimulationen eine Interaktion der Lernenden mit Handlungsoptionen zu verschiedenen Klimaereignissen ermöglichen. Weil UDZ auch für das Katastrophenmanagement eingesetzt werden, sind sie besonders resilient gestaltet, um im Katastrophenfall auch weiter funktionsfähig zu bleiben.

Vor dem Hintergrund des sich verstärkenden Klimawandels verlangt die Gesellschaft konsequentes politisches Handeln, um Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel umzusetzen. Ein wirksames Instrument für die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen sind Bürgerbeteiligungsverfahren, bei denen Bewohner/innen von Städten die Entwicklung in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft beeinflussen können.

Verbindliche Ziele und Maßnahmen: politische Masterpläne zum Erreichen der Klimaneutralität

Gesellschaftlicher Druck und gesetzliche Vorgaben haben das Handeln der Politik auf Bundes- und Landesebene beeinflusst. Um die verbindlichen Vorgaben zum Schutz des Klimas zu erfüllen und das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, ist die deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel über Jahre hinweg weiterentwickelt und verschärft worden, sodass mittlerweile für alle Sektoren die jeweiligen Pflichten und Prioritäten nachvollziehbar festgelegt sind.

Um diese Maßnahmen in städtischen Gebieten umzusetzen, wurden UDZ als zentrales Planungsinstrument etabliert: Ihr Einsatz ist Teil gesetzlicher Vorgaben geworden.

Lokal resilient: Kommunen als Vorreiter bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels

Der Bund unterstützt die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels mit finanziellen Mitteln in erheblichem Umfang. Allerdings müssen Kommunen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllen, um Fördermittel beziehen zu können. Eine davon ist die Entwicklung konkreter Klimaanpassungspläne auf Grundlage digitaler Zwillinge. Fördermittel für einzelne Maßnahmen werden nur vergeben, wenn diese auf aktuellen, qualitativ hochwertigen Informationen basieren und deren Wirkung anhand vorheriger Simulationen bestmöglich antizipiert werden kann.

Da zahlreiche Kommunen über jahrelange Erfahrungen bei der Anwendung digitaler Zwillinge verfügen, gibt es sehr viele positive Beispiele für die Umsetzung von Maßnahmen, sodass Beteiligte in kommunalen Verwaltungen sehr gut voneinander lernen können.

Nachhaltige Rendite: Klimaanpassung als Investitionsmotor

Die oben skizzierten Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels verursachen enorme finanzielle Anstrengungen. Es gelingt allerdings mit der Nutzung digitaler Zwillinge, diese Anstrengungen in gesellschaftlich verträglicher Art und Weise zu bewältigen. Zum einen ermöglichen UDZ die Konzeption von Ausgleichsmechanismen, die dafür sorgen, dass sozial schwache Gruppen weniger durch die steigenden Kosten für Klimaanpassungsmaßnahmen belastet werden. Zum anderen können Städte und der Bund mithilfe digitaler Zwillinge Priorisierungen innerhalb begrenzter öffentlicher Budgets vornehmen, um ihre verfügbaren Mittel für die Umsetzung von besonders wichtigen Anpassungsmaßnahmen zu verwenden.

Nachhaltige Anleihen oder Public Private Partnerships etablieren sich als weitere Instrumente für die Finanzierung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Informationen über getätigte Investitionen werden in UDZ genutzt, um die Wirksamkeit im Vorfeld durch Simulationen und eine Evaluation des erreichten Impacts im Nachhinein zu

ermitteln. Dank der Priorisierung von Investitionsmöglichkeiten durch UDZ überwiegen Investitionen in nachhaltige Technologien gegenüber solchen in fossile Technologien, sodass sich ein Festhalten an nicht nachhaltigen Lösungen nicht länger lohnt.

Offene urbane Datenökosysteme

Bis 2035 entstehen in Städten offene Datenökosysteme mit Informationen über zahlreiche wichtige Parameter, wie Luftqualität, Temperatur, Wasserverbrauch etc. Ein Merkmal dieser Datenökosysteme sind die offenen Schnittstellen, die es Akteuren aus Wirtschaft und Zivilgesellschaft ermöglichen, datenbasierte Anwendungen zu entwickeln. Das können beispielsweise Apps sein, die Ampeln anhand von Verkehrsfluss und Verkehrslärm autonom steuern und auch Fußgänger/innen bei der optimalen Routenfindung unterstützen.

Grundsätzlich sind digitale Zwillinge nach dem Prinzip der Datensparsamkeit gestaltet, das heißt, es werden nur so viele Daten erfasst und verarbeitet, wie es für spezifische Anwendungsfälle erforderlich ist. Stadtbewohner/innen können freiwillig Daten in diese Netze einspeisen, um sie noch präziser zu gestalten und die Modelle und Simulationen zu verbessern. Solche Daten können beispielsweise Bewegungsdaten sein, die auf Barrieren im Alltag hinweisen, oder Gesundheitsdaten, die eine besondere Belastung in bestimmten Umgebungen während Hitzewellen anzeigen.

Künstliche Intelligenz zum Wohle der Bevölkerung

Die Häufigkeit von durch den Klimawandel verursachten Extremwetterereignissen hat bis zum Jahr 2035 zugenommen. Umso wichtiger ist es geworden, die Auswirkungen unterschiedlicher Extremwetterereignisse vorherzusagen zu können, um die Folgen abschwächen zu können. UDZ sind nicht nur in der Lage, hochdetaillierte Abbilder von Städten zu erzeugen, sondern auch zu simulieren, welche Wirkungen unterschiedliche Wetterereignisse wie Starkregen, Hitze oder Stürme in einer städtischen Umgebung haben können.

Mithilfe künstlicher Intelligenz können diese Simulationen in Echtzeit ausgewertet und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Dies umfasst beispielsweise eine resiliente Stadtentwicklung, um die negativen Folgen zu minimieren, die Umsetzung von CO₂-Ausgleichsmechanismen mit Smart Contracts oder auch ein akutes Notfallmanagement im Katastrophenfall zu ermöglichen.

6.3 Szenario 2: Insellösungen und verpasste Chancen

Minimalziele und niedrige Standards: digitale Zwillinge als unterstützendes Instrument

In einer mehrjährigen und kontrovers geführten Auseinandersetzung ist es gelungen, ein einheitliches Rahmenwerk für die Nutzung kompatibler digitaler Monitoringinfrastrukturen zu entwickeln; allerdings gestattet es dieses Rahmenwerk den Kommunen, individuelle Lösungen umzusetzen. Damit gelingt immerhin ein einheitliches Monitoring von Emissionen sowie von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Jedoch unterscheiden sich die dazu genutzten Systeme zum Teil stark voneinander, weil sie beispielsweise auf unterschiedlichen Datengrundlagen basieren und mit unterschiedlichen Algorithmen arbeiten.

Digitale Zwillinge sind teilweise in Monitoringsysteme integriert, aber nicht flächendeckend im Einsatz. Somit ist zwar die Vergleichbarkeit der Informationen gegeben, eine umfassende Vorhersage von möglichen (Wechsel-)Wirkungen ist jedoch nur in Einzelfällen möglich.

Spaltung und Polarisierung: eine fragmentierte Gesellschaft in den 2030er Jahren

Im Jahr 2035 sind die Gefahren durch den Klimawandel spürbar gestiegen. Da jedoch trotz zunehmender Extremwetterereignisse wie Hitzewellen, Stürmen, Hochwasser und Waldbränden immer nur Teile der deutschen Gesellschaft betroffen sind, fehlt ein gesamtgesellschaftlicher Konsens über die Dringlichkeit des Handelns. Politische Maßnahmen sind oft nur Reaktionen auf Katastrophen und stoßen vielfach auf Widerstand aus der Bevölkerung.

Obwohl mit digitalen Zwillingen ein Instrument verfügbar ist, das zur Aufklärung über die Auswirkungen des Klimawandels beitragen kann, werden sie nur vereinzelt in der Bildung eingesetzt. Fehlende Akzeptanz der Bevölkerung und mangelnde Bereitschaft, neue Technologien zu nutzen, verhindern eine breitere Nutzung digitaler Zwillinge.

Unverbindlichkeit und fehlende Orientierung: Klimapolitik mit geringer Priorität

Obwohl die Folgen des Klimawandels bis zum Jahr 2035 extremer werden, fehlt es an eindeutigem politischem Willen und juristischer Verpflichtung, um geeignete Maßnahmen zur Anpassung umzusetzen. Eine konsensfähige Strategie und Maßnahmenplanung konnten so bislang nicht entstehen.

Punktuell reagiert die Bundesregierung dennoch mit geeigneten Maßnahmen: entweder als Reaktion auf besonders extreme Ereignisse oder auf besonderen öffentlichen Druck, beispielsweise bei der Umsetzung geeigneter Schutzmaßnahmen vor extremer Hitze in innerstädtischen Umgebungen. Teilweise gelingt es auch, Maßnahmen umzusetzen, indem internationale Best-Practice-Beispiele als Orientierung dienen.

Föderalismus bei der Anpassung an den Klimawandel

Eine bundesweite Strategie zum Schutz des Klimas und der Menschen vor den negativen Folgen des Klimawandels wurde durch jahrelange politische Auseinandersetzungen und eine stärkere Polarisierung der Gesellschaft immer weniger konsequent umgesetzt und weiterentwickelt. Fehlende Unterstützung des Bundes und ungeklärte Zuständigkeiten zwischen Ländern und Bund trugen dazu bei, dass eine ganzheitliche Umsetzung von UDZ ausbleibt.

Im Jahr 2035 gehen dennoch einige Bundesländer ihre eigenen, ambitionierten Wege. Vor allem diejenigen Regionen in Deutschland, die besonders betroffen sind, wie etwa die Küstenregionen durch den steigenden Meeresspiegel, die Bundesländer mit einer hohen Bevölkerungsdichte, aber auch die Bundesländer mit besonders innovativen Technologieunternehmen, entwickeln ihre eigenen Maßnahmen.

Digitale Zwillinge sind vor allem in größeren Kommunen dieser Bundesländer wirksame Instrumente bei der Maßnahmenplanung und -umsetzung. Beispielsweise können so frühzeitig sich abzeichnende Hitzeinseln in Städten identifiziert und die Bevölkerung durch geeignete Maßnahmen präventiv geschützt werden. Kleinere Kommunen mit begrenzten finanziellen Spielräumen haben das Nachsehen.

Zurückhaltende Investitionsbereitschaft

Bis 2035 wird an fossilen Technologien sowie dem Leitbild der Technologieoffenheit festgehalten. Investitionen in nachhaltige Technologien und effektive Maßnahmen zum Schutz von Klima und Bevölkerung erweisen sich daher nicht als besonders profitabel und sind nur von nachgelagertem Interesse.

Auch die staatliche Förderung von Maßnahmen orientiert sich vor allem an eindeutig messbaren Wirkungen. Davon profitieren insbesondere die Städte, die bereits umfangreich mit digitalen Zwillingen arbeiten und Wirkungszusammenhänge zwischen finanziellen Mitteln und umgesetzten Maßnahmen eindeutig belegen können. Insofern kommt es zu einer Verschärfung regionaler Unterschiede zwischen Kommunen.

Einzellösungen und Entscheidungssilos: digitale Zwillinge in der Planung

Bis 2035 haben UDZ trotzdem in verschiedenen Fachabteilungen der Kommunalverwaltungen Einzug gehalten. Eine besonders breite Anwendung hat sich in den Bauämtern und bei der Stadtplanung etabliert. Nur punktuell wurden umfassende digitale Zwillinge etabliert, deren Einsatz über die Planung weit hinausgeht und bis zur Vorhersage von Wirkungen unterschiedlicher Maßnahmen reicht.

Auch die Nutzung der Echtzeitfähigkeit von Datenanalyse, Simulation und Vorhersage sowie die Integration in kommunale Entscheidungsprozesse hat sich bislang nicht flächendeckend etablieren können.

Fragmentierte Datenökosysteme

Die verfügbaren Datenmengen aus Sensoren sind bis 2035 stark angestiegen. Mittlerweile gibt es zahlreiche Möglichkeiten, Daten über den Zustand von Städten zu sammeln. Hierzu kommen unterschiedliche Sensorsysteme als Datenquellen zum Einsatz, vom Smart Device der Bewohner/innen über passive Sensoren bis hin zu hochauflösenden Kameras.

Jedoch sind nicht alle diese Daten uneingeschränkt für die Analyse mit digitalen Zwillingen nutzbar. Vielmehr gibt es viele Datenfragmente, die unverbunden nebeneinanderstehen: Zum Teil müssen sie aktiv geteilt werden, was in Teilen der Bevölkerung auf Widerstand stößt. Zum Teil sind sie Eigentum von Unternehmen, die nur eine kostenpflichtige Nutzung zulassen. Daneben können bestimmte Daten auch öffentlich und somit uneingeschränkt nutzbar sein. Da sich diese Datenräume von Kommune zu Kommune unterscheiden, sind die digitalen Zwillinge

von sehr unterschiedlicher Qualität und nur mit sehr hohem technischem und finanziellem Aufwand untereinander kombinierbar.

6.4 Szenario 3: Reaktive Maßnahmen und zögerliche Umsetzung

Zögerliche Umsetzung: Digitale Zwillinge bleiben theoretische Konzepte

Auf kommunaler Ebene werden Maßnahmen zum Schutz vor den Folgen des Klimawandels häufig nur bei konkretem Anpassungsdruck ausreichend priorisiert. Üblicherweise werden andere Bereiche des städtischen Lebens bzw. der städtischen Infrastruktur als wichtiger und dringender erachtet. Eine strategische Entwicklung von Städten unter dem Leitbild einer zwingend erforderlichen Anpassung an den Klimawandel erfolgt nicht.

Digitale Zwillinge spielen in den strategischen Planungen auf kommunaler Ebene nur eine untergeordnete Rolle. Die Möglichkeiten, mit digitalen Zwillingen nicht nur Maßnahmen der Klimaanpassung, sondern auch andere Maßnahmen zur Entwicklung der städtischen Infrastruktur planerisch umzusetzen, wie beispielsweise Investitionen in soziale Einrichtungen oder die Schaffung von Wohnraum, bleiben weitgehend ungenutzt.

Trägheit und fehlende Mitwirkung: eine zufriedene Gesellschaft in den 2030er Jahren

Im Jahr 2035 sind die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels nicht nur in Deutschland, sondern auch in Europa sowie der restlichen Welt deutlich sichtbar. Die Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen haben stark zugenommen und der mittlere Temperaturanstieg in Deutschland beträgt 1,7 °C. Obwohl die Zahl der Geschädigten in der deutschen Bevölkerung jährlich steigt, hat sich ein umfassendes Festhalten am Status quo etabliert. Veränderungen zum Schutz der Bevölkerung vor den Auswirkungen des extremen Klimas finden keine gesellschaftlichen und politischen Mehrheiten.

Wer es sich leisten kann, ergreift individuelle Maßnahmen, ein Großteil der Gesellschaft ist jedoch den Auswirkungen des Klimawandels weitestgehend schutzlos ausgeliefert. Viele Bemühungen, mittels virtueller Technologien und UDZ zu einer verbesserten Aufklärung über die Folgen des Klimawandels beizutragen, sind erfolglos gewesen.

Unentschlossen und traditionsorientiert: Klimaschutz ist kein politisches Thema mehr

Die Bundesregierung im Jahr 2035 handelt nur, wenn sie muss. Klimaschutz und Schutz der Bevölkerung vor den Folgen des Klimawandels haben keine hohe Priorität für politische Entscheidungsträger/innen, und Maßnahmen finden selten Mehrheiten. Lediglich als Reaktion auf konkrete Anlässe, wie beispielsweise Überflutungen an Flüssen und Küsten, Hitzewellen und Dürreperioden, die hohen Schaden verursachen, werden kurzfristige Maßnahmen veranlasst. Eine übergeordnete Strategie mit einem wirksamen Maßnahmenpaket fehlt.

Dementsprechend gibt es keine Ansätze, die die Potenziale digitaler Zwillinge bei der Prävention und Anpassung an die Folgen des Klimawandels in einen strategischen Rahmen fassen. Auch eine integrative Berücksichtigung digitaler Zwillinge bei der Raum- und Infrastrukturplanung für städtische Gebiete fehlt.

Fehlende Anreize: Investitionsstau bei Klimaschutzmaßnahmen

Obwohl die Schäden, die durch Extremwetterereignisse verursacht werden, mittlerweile hohe Kosten verursachen, die das Versicherungswesen vor extreme Herausforderungen stellen, werden zahlreiche Investitionen aufgrund fehlender Anreize weiterhin in fossile Energieträger und veraltete Technologien geleitet. Vor allem Investitionen aus privatwirtschaftlichen Quellen erzielen auf diese Weise weiterhin auskömmliche Renditen.

Öffentliche Fördermittel werden vor allem für diejenigen Maßnahmen verwendet, die notwendig sind, um Schäden an der Infrastruktur zu minimieren. Eine vorausschauende Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen findet aufgrund fehlenden politischen Willens nur selten statt. Der Beitrag, den digitale Zwillinge bei einer Priorisierung von Maßnahmen leisten können, wird nur sehr vereinzelt genutzt.

Kommunale Flickenteppiche: Technische Lösungen werden selten standardisiert genutzt

Digitale Zwillinge werden im Jahr 2035 nur vereinzelt für spezifische Anwendungsfälle eingesetzt, beispielsweise die Verkehrsplanung. Eine einheitliche technische Basis hat sich trotz der Standardisierungsbemühungen bislang nicht etabliert. Vielmehr setzen Kommunen bzw. Kommunalverwaltungen auf Einzelfalllösungen, die aufgrund

fehlender technischer und organisatorischer Standards selten als Best Practices für andere Kommunen dienen können.

Die Potenziale digitaler Zwillinge werden längst nicht ausgeschöpft. Vielmehr wird in einigen Fällen ein rudimentäres Monitoring betrieben, das zwar Aufschluss über aktuelle Zustände von Teilen des Systems Stadt bietet, aber keinesfalls ein präzises Gesamtbild liefert. Somit bleibt eine Bewertung der Wirksamkeit von unterschiedlichen Maßnahmen lückenhaft.

Theoretisch ausgearbeitet, praktisch kaum relevant: Konzepte digitaler Zwillinge überzeugen nur selten

Jahrelange theoretische Diskussionen und wissenschaftliche Auseinandersetzungen haben zu komplexen und vollständig ausgearbeiteten Konzepten digitaler Zwillinge geführt. Die Umsetzung dieser Konzepte in die Praxis ist allerdings nicht vollendet. Eine ins Stocken geratene Digitalisierung der öffentlichen Verwaltung hat dazu geführt, dass kaum praktikable Schnittstellen für die Einbindung digitaler Zwillinge in Verwaltungsprozesse geschaffen worden sind.

Hinzu kommen rechtliche Hürden, beispielsweise unterschiedlich streng formulierte Datenschutzgesetze, die einen verwaltungsübergreifenden Transfer von Erfahrungen erschweren. Fehlender Erfahrungsaustausch zwischen Kommunen erschwert die weitere Entwicklung und praktische Umsetzung digitaler Zwillinge.

Fehlende Daten: Digitale Zwillinge leiden an Datenarmut

Zwar gibt es mittlerweile ein umfangreiches Angebot an unterschiedlichster Sensorik, allerdings werden nur wenige Parameter konsistent erfasst. Viele unterschiedliche Sensorsysteme sind herstellergebunden oder werden in der Praxis nicht flächendeckend eingesetzt. Die Daten, die auf diese Weise über den Zustand einer Stadt gesammelt werden können, sind oft lückenhaft und zum Teil fehlerhaft.

Fehlende Daten führen dazu, dass die Modelle, die mit digitalen Zwillingen arbeiten, unvollständig und wenig vertrauenswürdig sind. Sie bilden die Realität nicht präzise ab und eignen sich nur für rudimentäre Simulationen. Vorhersagen über künftige Systemzustände sind nur sehr eingeschränkt möglich.

7 Gestaltungsoptionen für urbane digitale Zwillinge

- Um UDZ flächendeckend und wirkungsvoll für eine klimaangepasste und nachhaltige Stadtentwicklung einsetzen zu können, sollten verschiedene technische, organisatorische und politische Gestaltungsoptionen miteinander verknüpft werden. Dazu gehören beispielsweise die Schaffung einer standardisierten Systemarchitektur, der Ausbau von IoT-Sensornetzwerken und skalierbaren Recheninfrastrukturen, die Umsetzung nutzungsfreundlicher Bedienschnittstellen, Einhaltung einer klaren Datengovernance, Etablierung nachhaltiger Finanzierungsmodelle, Schaffung eines verbindlichen Rechtsrahmens und die Gestaltung, orientiert an ethischen Leitlinien.
- Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich robuster Mess- und Bewertungsmetriken, mit denen der tatsächliche Mehrwert, die Kosteneffizienz, die gesellschaftlichen Auswirkungen und die langfristige Wirksamkeit von UDZ-basierten Maßnahmen quantifiziert und deren Integration in Verwaltungs- und Planungsprozesse systematisch untersucht werden.

Gegenwärtig befinden sich bereits zahlreiche UDZ in deutschen Kommunen in unterschiedlichen Phasen der Umsetzung (Kapitel 2.4). Sie bieten vielfältige Potenziale für eine nachhaltige und klimaangepasste Stadtentwicklung, wie beispielsweise effizientere Bewertung von Maßnahmen zum Umweltschutz oder der Klimafolgenanpassung sowie die bessere Berücksichtigung vulnerabler Bevölkerungsgruppen durch räumlich differenzierte Analysen (Kapitel 3). Allerdings gibt es noch zahlreiche zu lösende Herausforderungen, etwa die Schaffung standardisierter Dateninfrastrukturen, umfassender Sensornetzwerke zur Echtzeitüberwachung städtischer Parameter oder die Entwicklung langfristig tragfähiger Finanzierungsmodelle (Kapitel 4). Um die Potenziale zu heben und die Herausforderungen zu bewältigen, gibt es unterschiedliche Ansatzpunkte, die zu einer erfolgreichen Gestaltung von UDZ beitragen können. Dazu gehört unter anderem die Schaffung geeigneter Datengovernancestrukturen innerhalb kommunaler Verwaltungen, die Etablierung geeigneter finanzieller Rahmenbedingungen, die Berücksichtigung und Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen sowie die Einbeziehung ethischer Grundsätze in die Entwicklung und Nutzung von UDZ (Kapitel 5).

Aktuell kann nicht belastbar prognostiziert werden, in welchem Umfang UDZ künftig als autonome Entscheidungssysteme innerhalb der Stadtentwicklung eingesetzt werden, ob es dabei zu einer flächendeckenden Anwendung kommt oder der Einsatz/die Nutzung auf wenige Einzelfälle beschränkt bleiben wird. Es erscheint plausibel, dass eine Vielzahl spezifischer Fachzwillinge für unterschiedliche Anwendungsfälle entstehen wird. Inwieweit dadurch die Potenziale für nachhaltige, klimaangepasste Stadtentwicklung gehoben werden können, ist derzeit noch offen.

Die drei vorgestellten Szenarien umreißen unterschiedliche mögliche und plausible zukünftige Entwicklungen von UDZ und reduzieren dabei die Komplexität der aktuellen Entwicklungen (Kapitel 6). Einerseits ist denkbar, dass es innerhalb des Zeitraums bis 2035 zu einer dynamischen, politisch sinnvoll gesteuerten und umfassenden Weiterentwicklung von UDZ kommt, sodass sie künftig in vielen deutschen Städten Teil der Stadtentwicklung sein werden (Kapitel 6.2). Andererseits ist aber auch vorstellbar, dass die bisherige Entwicklung von UDZ bereits eine Art Höhepunkt erreicht hat und deren Weiterentwicklung aufgrund unterschiedlicher Faktoren, wie etwa fehlender politischer Zielsetzungen, mangelnder Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten und unzureichenden gesellschaftlichen Rückhalts, stockt bzw. zum Erliegen kommt (Kapitel 6.4). Auch ein Mittelweg ist plausibel, bei dem es Städte gibt, die sehr erfolgreich UDZ entwickeln und anwenden, aber auch solche, in denen eine Realisierung nicht zustande kommt. Ein derartiger Flickenteppich erschwert übergreifende Strategien und den Austausch von Erfahrungswissen (Kapitel 6.3).

Alle drei Szenarien erscheinen durchaus realistisch. Laut Einschätzung der Fokusgruppe ist allerdings das Szenario 1, in dem UDZ weit verbreitet und erfolgreich eingesetzt werden (Kapitel 6.2), klar wünschenswerter als das andere diskutierte Szenario 2 (Fokusgruppe). Begründet wird das damit, dass dieses Szenario erhebliche Mehrwerte bietet, etwa indem UDZ konkret an die Bedürfnisse der Bürger/innen angepasst sind und alltagsrelevante Vorteile liefern. Zudem wird in diesem Szenario die Lebensqualität der Bürger/innen, die mit dem voranschreitenden Klimawandel leben, durch Stadtentwicklungsmaßnahmen gesteigert. Demgegenüber steht die Einschätzung der Fokusgruppe zum Szenario 2, in dem UDZ nur vereinzelt umgesetzt werden (Kapitel 6.3). Dieses Szenario wird als realistischer eingeschätzt, aber gleichzeitig als weniger erstrebenswert. Vor allem die Gefahr, dass bestehende soziale Ungleichheiten weiter verstärkt werden, UDZ zusätzliche Bürokratie verursachen und durch mangelnde Transparenz auch zu einem weiteren Vertrauensverlust in Politik und Verwaltung beitragen, wird als problematisch angesehen (Fokusgruppe). Anhand der Auseinandersetzung mit den Szenarien in der Fokusgruppe

zeigt sich, dass durchaus Akzeptanz und Beteiligungsbereitschaft bei Mitgliedern der Zivilgesellschaft vorhanden sind. Die zivilgesellschaftliche Perspektive kann daher auch für die künftige Weiterentwicklung von UDZ wertvolle Hinweise liefern.

Gestaltungsoptionen

Um das aus Sicht zivilgesellschaftlicher Personen als besonders positiv wahrgenommene Szenario zu realisieren und damit die weniger positiv eingeschätzten Szenarien zu vermeiden, bietet sich eine Reihe von Gestaltungsoptionen technologischer, organisatorischer und politischer Art an. So gibt es technologische Optionen, die der (Weiter-)Entwicklung der technischen Infrastrukturen auf kommunaler Ebene dienen. Hinzu kommen organisatorische Optionen, die zur Schaffung institutioneller Voraussetzungen auf Ebene der Kommunalverwaltungen sowie geeigneter Partizipationsmöglichkeiten durch verwaltungsfremde Akteure aus Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft beitragen. Schließlich bestehen politische Optionen zur Schaffung geeigneter rechtlicher und strategischer Rahmenbedingungen sowie zur Gestaltung geeigneter Förderprogramme auf Bundesebene.

Zu den *technischen Gestaltungsoptionen* gehört zunächst die *Umsetzung standardisierter Systemarchitekturen*, also die Implementierung von Schnittstellen für den Austausch von Daten, die Bereitstellung von Rechenkapazitäten für die Datenverarbeitung sowie die Implementierung von Nutzerschnittstellen. Für die Umsetzung technischer Standards liegen bereits umfassende Normen vor (DIN 2024). Eine weitere Option sind der konsequente *Auf- und Ausbau von IoT-Sensorinfrastrukturen*, mit denen eine Echtzeitdatenerfassung möglich wird. Nur so kann es gelingen, detaillierte Zustandsbeschreibungen städtischer Umgebungen zu erstellen und für weitere Analysen zu verwenden. Eine dritte Option ist der *Aufbau skalierbarer Computinglösungen* für die Verarbeitung sämtlicher anfallender Daten, sodass die Modellierung und Simulierung von Szenarien sowie die Visualisierung von AR/VR-Modellen effizient umgesetzt werden können. Letztlich ist die *Gestaltung nutzungsfreundlicher Bedienschnittstellen*, wie Dashboards und Apps, eine weitere technische Option. Anwendungsfreundliche Bedienschnittstellen tragen dazu bei, dass komplexe Zusammenhänge beispielsweise durch 3D-Visualisierungen verständlich für Verwaltung und Bevölkerung aufbereitet werden können. Alle vier *Gestaltungsoptionen* sollten gemeinsam realisiert werden, weil sie durch wechselseitige Abhängigkeiten gekennzeichnet sind. Eine umfassende IoT-Sensorinfrastruktur kann nichts zur erfolgreichen Implementierung eines UDZ beitragen, wenn keine ausreichenden Rechenkapazitäten entstehen oder ausreichend technische Standards umgesetzt sind. Um die genannten Optionen umzusetzen, bietet es sich an, bei bereits existierenden Pilot- und Einzellösungen anzusetzen und die dort erprobten Lösungen auf ihre Skalierbarkeit zu prüfen. In Form modularer, interoperabler Systeme können einzelne Bestandteile von UDZ weiterentwickelt und für andere Kommunen verfügbar gemacht werden. Auf diese Weise können Baukästen mit unterschiedlichen UDZ entstehen, die bedarfsgenau in den jeweiligen Städten und Kommunen verwendet werden können.

Die *organisatorischen Gestaltungsoptionen* betreffen vor allem die Veränderung von Verwaltungsstrukturen sowie die Ermöglichung einer partizipativen Gestaltung von UDZ, das heißt die Etablierung von Beteiligungsmöglichkeiten bei der Anwendung von UDZ. Zunächst besteht die Option, innerhalb kommunaler Verwaltungen eine *konsequente Umsetzung von Datengovernancevorgaben* zu verfolgen. Verbindliche Datengovernancestrukturen stellen eine wichtige Grundlage auch für die Realisierung der technischen Gestaltungsoptionen dar. Um geeignete Datengovernancestrukturen zu schaffen, ist es notwendig, die bisherigen Strukturen in der kommunalen Verwaltung weiterzuentwickeln und beispielsweise interdisziplinäre Teams einzurichten, die spezifisch mit der Anwendung von UDZ betraut sind und die dafür erforderlichen Organisationseinheiten in der öffentlichen Verwaltung (Fachabteilungen, Ressorts, etc.) vernetzen. Dafür ist die *Implementierung entsprechender Rollenmodelle* (Kapitel 5.1) eine Voraussetzung. Eine dritte organisatorische Gestaltungsoption ist die *bürgerzentrierte Entwicklung*, die auf einer *partizipativen Implementierung* und Anwendung von UDZ basiert und von einer *zielgruppengerechten Kommunikation* flankiert wird. Ein Risiko bei der Anwendung von UDZ besteht darin, dass es zu einer Ausgrenzung einzelner gesellschaftlicher Gruppen kommt – nämlich derjenigen, die keinen oder nur sehr eingeschränkten Zugang zu digitalen Angeboten haben bzw. nur über gering ausgeprägte Digitalkompetenzen verfügen. Deshalb sollte bei der Einführung digitaler Zwillinge auch darauf geachtet werden, digitale Kompetenzen der Stadtgesellschaft auf- und eventuelle Zugangsbarrieren abzubauen. Dazu gehört die angemessene Kommunikation bzw. Wissensvermittlung über den Nutzen und die Beteiligungsmöglichkeiten digitaler Zwillinge (Fokusgruppe), die nicht nur digitale Kommunikationsangebote beinhaltet, sondern auch Gesprächsangebote in betroffenen Stadtvierteln bzw. Quartieren umfasst.

Politische Gestaltungsoptionen können für die Nutzung technischer und organisatorischer Gestaltungsoptionen den *langfristigen Rahmen* bilden. Teil dieses Rahmens ist die *Schaffung verbindlicher rechtlicher Grundlagen* für die Nutzung von UDZ. Aus den rechtlichen Grundlagen sollte ersichtlich sein, wie UDZ in Klimaanpassungsstrategien integriert werden sollten, um im Einklang mit den Sustainable Development Goals sowie orientiert an Leitbildern der Gemeinwohlorientierung und der langfristigen Resilienz ihre Potenziale entfalten zu können. Ebenfalls sollten die rechtlichen Grundlagen dafür sorgen, dass *Standardisierung, Datenschutz und Verantwortlichkeiten eindeutig geklärt* sind. Eine weitere Option ist die *Integration von UDZ* als zentrales Werkzeug für die strategische Stadtentwicklung, Klimaanpassung und gesellschaftliche Resilienz in *kommunale Klimaschutz- und Stadtentwicklungsstrategien*. Dabei kann festgehalten werden, dass die Szenarien zwei unterschiedliche Richtungen der politischen Governance implizieren: Dort, wo übergeordnete, auf Bundesebene verbindlich verankerte Strategien und Maßnahmen zum Schutz des Klimas und damit der Lebensgrundlage der Menschen fehlen, können Kommunen im Rahmen ihrer begrenzten Möglichkeiten selbst tätig werden und UDZ realisieren. Die Herausforderungen einer langfristigen Finanzierung und verlässlicher rechtlicher Rahmenbedingungen (zum Beispiel Haftungsfragen, Vergabe- und Genehmigungsverfahren) müssten in diesem Fall vor allem auf kommunaler Ebene gelöst werden. Wenn umgekehrt jedoch ein bundesweit verbindlicher Rahmen für Klimaschutz und Klimaanpassung vorgegeben wird, der explizit die Anwendung von UDZ auf kommunaler Ebene vorsieht und unterstützt (etwa durch langfristige Finanzierungsmöglichkeiten, technische Standardisierung und Interoperabilität, Austauschplattformen für Erfahrungswerte etc.), dann besteht eher die Möglichkeit, dass sich Ökosysteme von UDZ in deutschen Städten etablieren können. Eine dritte Option stellt die *gezielte Förderung von Innovationsökosystemen* für UDZ dar. Somit kann dafür gesorgt werden, dass bisher existierende Insellösungen zu skalierbaren und übertragbaren Anwendungsfällen weiterentwickelt werden können. Damit einher geht auch die Schaffung von langfristigen Finanzierungsmöglichkeiten durch geeignete öffentliche Förderung, die insbesondere für Kommunen mit begrenztem finanziellem Spielraum einen Anreiz darstellen kann, UDZ zu realisieren.

Weiterführender Untersuchungsbedarf

Eine politisch unterstützte langfristige Entwicklungsperspektive für UDZ kann auch dazu beitragen, noch ungeklärte Fragen zu klären. Es lassen sich mehrere *zentrale Forschungs- und Analysebedarfe* ableiten:

- Messung des tatsächlichen Mehrwerts durch Entwicklung und Validierung von Metriken, die den Nutzen von UDZ für Stadtplanung sowie Ressourcen-, Effizienz- und Klimaanpassung quantifizieren
- Erbringung von Kausal- und Wirkungsnachweisen mittels Durchführung von Langzeitstudien, die den direkten Zusammenhang zwischen UDZ-gestützten Maßnahmen und beobachteten Verbesserungen (zum Beispiel Emissionsreduktion, Hitzeminderung, Resilienz) ermitteln
- interdisziplinäre Untersuchungen der Auswirkungen auf die Lebensqualität, v. a. wie UDZ-Anwendungen das Wohlbefinden, die Teilhabe und die soziale Gerechtigkeit in der Stadtbevölkerung beeinflussen
- Evaluation von Daten- und Modellqualität durch systematische Prüfungen der Datenintegrität, Modellgenauigkeit und Unsicherheitsabschätzungen, um zuverlässige Entscheidungsgrundlagen zu sichern
- Analysen, wie UDZ-Ergebnisse praktisch in Planung, Genehmigung und operative Steuerung eingebettet werden können, inklusive rechtlicher und organisatorischer Rahmenbedingungen, um eine bessere Integration in Verwaltungsprozesse zu erreichen
- Kosten-Nutzen-Analysen und Evaluation von Finanzierungsmodellen mittels wirtschaftlicher Untersuchungen, die langfristige Investitions- und Betriebskosten gegen erwartete Einsparungen und gesellschaftliche Nutzen abwägen
- Partizipations- und Akzeptanzforschung zur Frage, wie Bürger/innen UDZ-Werkzeuge wahrnehmen, welche Barrieren bestehen und welche Beteiligungsformen effektiv funktionieren

Insgesamt kann die Frage, welchen Mehrwert UDZ im Rahmen der Stadtentwicklung liefern können, bislang nicht eindeutig beantwortet werden. Das liegt unter anderem darin begründet, dass die Auswirkungen von Entscheidungen, die auf Basis von UDZ getroffen werden, oft langfristig und schwer isoliert zu ermitteln sind. Die Messung des tatsächlichen Mehrwerts, die Identifizierung von Kausalzusammenhängen und die Validierung der Modelle erfordern innovative Methoden und Metriken. Es ist wichtig, nicht nur technische Aspekte wie etwa Datenqualität oder Modellgenauigkeit zu bewerten, sondern auch die Auswirkungen auf die Lebensqualität der Bürger/innen und die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele. Zukünftige Forschungen werden zeigen müssen, unter

welchen Rahmenbedingungen UDZ in der Lage sind, weitere positive Effekte zu erzeugen, zum Beispiel eine höhere Zufriedenheit der Stadtgesellschaft durch transparentere Prozesse (BBSR 2023a, S. 34; Bibri et al. 2025). Damit UDZ wirklich zu einer klimaresilienten und nachhaltigen Stadtentwicklung beitragen können, muss ihr Nutzen mess- und nachweisbar gemacht werden. Zudem müssen ihre Datengovernancestrukturen robust gestaltet und ihre Anwendung konsequent in Planung, Verwaltung und Bürgerbeteiligung verankert werden.

8 Literatur

- Abbas, A. et al. (2025): Integrating Digital Twin and Nature Based Solutions for Climate Resilient Urban Design: A Predictive Framework for Future Ready Residential Neighborhoods in the Anthropocene. In: European Journal of Science and Modern Technologies 1(5), S. 1–14, [https://doi.org/10.59324/ejsmt.2025.1\(5\).01](https://doi.org/10.59324/ejsmt.2025.1(5).01)
- Anz, P. (2025): Zürich beschafft „Digitalen Zwilling Verkehrsmanagement“. Inside IT, <https://www.inside-it.ch/zuerich-beschafft-digitalen-zwilling-verkehrsmanagement-20250325> (30.1.2026)
- Argota Sánchez-Vaquerizo, J. (2025): Urban Digital Twins and metaverses towards city multiplicities: uniting or dividing urban experiences? In: Ethics and information technology 27(4), <https://doi.org/10.1007/s10676-024-09812-3>
- BBSR (2023a): Digitale Zwillinge. Potenziale in der Stadtentwicklung (Autor/innen: Brandt, S. et al.). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Smart City Dialog, Bonn
- BBSR (2023b): Urbane Datenplattformen. Von der Idee bis zur Umsetzung: Entscheidungshilfen für Kommunen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn
- Bertelsmann Stiftung (o. J.): Ökologische Nachhaltigkeit. <https://pub.bertelsmann-stiftung.de/nachhaltiger-wohlstand-fuer-alle/oekologische-nachhaltigkeit#section1> (15.8.2025)
- Bibri, S. E. et al. (2025): Synergistic integration of digital twins and zero energy buildings for climate change mitigation in sustainable smart cities: A systematic review and novel framework. In: Energy and Buildings 333, Art. 115484, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115484>
- Blüml, M. et al. (2025): Digitale Zwillinge für Bau, Infrastrukturmanagement und -betrieb: Chancen, Anwendungsbereiche, Umsetzungsoptionen. iRights.Lab GmbH, Berlin
- BMUKN (o. J.): 17 Nachhaltigkeitsziele – SDGs. Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, <https://www.bundesumweltministerium.de/WS5613> (25.3.2026)
- BMUKN (o. J.): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Stand: 2.9.2025. Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie> (2.6.2026)
- BMWSB (2024): Stufenplan Smarte Städte und Regionen. Gemeinsam digital handlungsfähig sein. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin
- Boccardo, P. et al. (2024): Urban Echoes: Exploring the Dynamic Realities of Cities through Digital Twins. In: Land 13, Art. 635, <https://doi.org/10.3390/land13050635>
- Breckner, I. (2018): Nachhaltige Stadtentwicklung. Sozialverträglichkeit und Umweltorientierung in der Stadtentwicklung. Bundeszentrale für politische Bildung, <https://www.bpb.de/themen/stadt-land/stadt-und-gesellschaft/216884/nachhaltige-stadtentwicklung/> (9.3.2026)
- Bundesregierung (o. J.): Die 17 globalen Nachhaltigkeitsziele. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/nachhaltigkeitsziele-erklart-232174> (2.6.2026)
- CUT (2023): Handlungsfeld Rollen. Connected Urban Twins, https://www.connectedurbantwins.de/app/uploads/2024/07/Rollen_v1.0_CUT_Layout.pdf (2.6.2026)
- CUT (o. J.): Urbaner Digitaler Zwilling. <https://www.connectedurbantwins.de/wissenstransfer/glossar/#udz> (2.6.2026)
- DeGEval (2025): Nachhaltigkeit in Evaluationen berücksichtigen. Orientierungshilfe für die Verwendung von Nachhaltigkeit als Evaluationskriterium. DeGEval – Gesellschaft für Evaluation, Saarbrücken
- Dembski, F. et al. (2020): Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. In: Sustainability 12(6), Art. 2307, <https://doi.org/10.3390/su12062307>
- Deutscher Städtetag (2023): Urbane Digitale Zwillinge. Eine Stadt sehen, verstehen und lebenswert gestalten (Autor/innen: Eichhorn, T. et al.). Berlin
- DIN (2024): DIN SPEC 91607. Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin, <https://doi.org/10.31030/3575521>

- Ebert, E. (2023): Klimaschutz versus Naturschutz: Zwei unterschiedliche Themen, deren Zusammenspiel von großer Bedeutung ist. Heinrich-Böll-Stiftung Schleswig-Holstein, <https://www.boell-sh.de/de/2023/05/10/klimaschutz-versus-naturschutz-zwei-unterschiedliche-themen-deren-zusammenspiel-von> (9.3.2026)
- EK (2024): Towards networked Local Digital Twins in the EU. Europäische Kommission, <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/digital-2024-cloud-data-ai-07-digitaltwin> (9.3.2026)
- EK (o. J.): Europe's Digital Decade. Update: 21.5.2026. Europäische Kommission, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/europes-digital-decade> (2.6.2026)
- EK (o. J.): Smart Sustainable Cities Moving forward with Digital Twins (NexTCity). Europäische Kommission, <https://cordis.europa.eu/project/id/101159944/de> (9.3.2026)
- Fernandez, A. C. (2025): European Initiative Advances Digital Twin Technology for Cleaner, Healthier Cities. Swiss Tropical and Public Health Institute, <https://www.swisstph.ch/fr/news/news-detail-1/news/new-european-initiative-advances-digital-twin-technology-for-cleaner-healthier-cities> (9.3.2026)
- Ferré-Bigorra, J. et al. (2022): The adoption of urban digital twins. In: Cities 131, Art. 103905, <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>
- Fink, A.; Siebe, A. (2016): Szenario-Management. Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen. Frankfurt
- Gardner, B. (2024): Digital Twins for Climate Action: A Singapore Case Study. <https://datasmart.hks.harvard.edu/digital-twins-climate-action-singapore-case-study> (9.3.2026)
- GD Connect (o. J.): Citiverse. Generaldirektion Kommunikationsnetze, Inhalte und Technologien, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/citiverse> (9.3.2026)
- Godet, M. (2009): Toolbox for Scenario Planning. In: Glenn, J. C.; Gordon, T. J. (Hg.): Futures research methodology. The Millenium Project, Washington, D.C.
- Grieves, M. (2014): Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> (2.6.2026)
- Hämäläinen, M. (2020): Smart city development with digital twin technology. In: Pucihar, A. et al. (Hg.): 33rd Bled eConference – Enabling Technology for a Sustainable Society. June 28 – 29, 2020, Online Conference Proceedings. Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, S. 291–303
- hoferLand.digital (2022): Digitaler Zwilling: Nachstellung von Starkregen- und Hochwasserereignissen. <https://www.hoferland.digital/digitaler-zwilling-nachstellung-von-starkregen-und-hochwasserereignissen/> (2.6.2026)
- Hu, J. et al. (2023): A spatiotemporal intelligent framework and experimental platform for urban digital twins. In: Virtual Reality & Intelligent Hardware 5(3), S. 213–231, <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.08.018>
- Huzzat, A. et al. (2025): A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. In: Digital Engineering(4), Art. 100040, <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>
- ISI (2015): Models of Horizon Scanning. How to integrate Horizon Scanning into European Research and Innovation Policies (Autor/innen: Cuhls, K. et al.). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Kanton Basel-Stadt (2025): Die Geburt eines Zwillings. <https://www.bs.ch/news/2025-die-geburt-eines-zwillings> (9.3.2026)
- Kaynak, S. et al. (2025): City-scale digital twin framework for flood impact analysis: Integrating urban infrastructure and real-time data analytics. In: Urban Climate 64, Art. 102640, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102640>
- Kiehl, K. (2019): Urban-industrielle Ökosysteme. In: Kollmann, J. et al. (Hg.): Renaturierungsökologie. Berlin, S. 389–410, https://doi.org/10.1007/978-3-662-54913-1_22

- Kilpert, A.-M.; Qasem, R. A. (2024): Nachhaltige Stadtentwicklung: Mit Smart City und digitalem Zwilling die Nachhaltigkeit von Städten fördern. Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering, <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/nachhaltigkeit-stadtentwicklung/> (9.3.2026)
- Koeva, M. et al. (2024): The role of digital twins in mitigating urban heat islands. How cities are leveraging innovative technology for sustainable urban development. GIM International, <https://www.gim-international.com/content/article/the-role-of-digital-twins-in-mitigating-urban-heat-islands> (9.3.2026)
- Kosow, H.; Gaßner, R. (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin
- Lago, C. (o. J.): Going underground: The digital twin tech turning the Piccadilly line green. ERP Today, <https://erp.today/going-underground-the-digital-twin-tech-turning-the-piccadilly-line-green/> (9.3.2026)
- Lei, B. et al. (2023): Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. In: Automation in Construction 147, Art. 104716, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>
- Lübbers, A. (2024): Starkregen: Digitaler Zwilling im Dienst der Kommunen. Vorsorge gegen Wetterextreme. kommunal.de, <https://kommunal.de/Starkregen-Hochwasser-Hydro-Zwilling-Rheinland-Pfalz> (9.3.2026)
- Marx, A.; Seidel, T. (2025): Digitale Zwillinge in deutschen Städten: Vergleichende Analyse von Leistungsindikatoren und messbaren Auswirkungen. TUM Think Tank, München
- m-cons (2025): Künstliche Intelligenz und digitale Zwillinge für nachhaltige Stadtplanung. <https://www.m-cons.de/kuenstliche-intelligenz-schluesel-zur-nachhaltigen-stadtentwicklung-mit-digitalen-zwillingen/> (2.6.2026)
- MPIC (2025): Europäische Initiative für gesündere Städte. Max-Planck-Institut für Chemie <https://www.mpic.de/5820328/harmonie> (9.3.2026)
- Pan, X. et al. (2024): Assessing and forecasting collective urban heat exposure with smart city digital twins. In: Scientific reports 14(1), Art. 9653, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59228-8>
- Pillkahn, U. (2007): Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung. Der Weg in die unternehmerische Zukunft. Siemens AG, Erlangen
- Piqueret Rose, C. (2025): Hochwasser- und Katastrophenschutz: Den Zugang zum Digitalen Zwilling beschleunigen. aconium, <https://aconium.eu/hochwasser-und-katastrophenschutz-den-zugang-zum-digitalen-zwilling-beschleunigen/> (30.1.2026)
- Politecnico di Torino (2025): Digital Twins of Urban and Territorial Areas to Improve Public Services. <https://www.polito.it/en/polito/communication-and-press-office/poliflash/digital-twins-of-urban-and-territorial-areas-to-improve> (2.6.2026)
- Richthofen, A. von et al. (2023): Wissenschaftliche Begleituntersuchung zu digitalen Zwillingen von Kommunen im Bundesgebiet. Stadt Regensburg, Amt für Stadtentwicklung, Regensburg, <https://doi.org/10.5281/zenodo.10014903>
- Sahr, F. et al. (2023): Resilienz in der Smart City. Wie Kommunen besser mit Krisen umgehen und proaktiv eine nachhaltige Zukunft gestalten können. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung; Kompetenzzentrum Wasser Berlin; Deutsches Institut für Urbanistik, Bonn
- Schlagbauer, A. (2024): Daten aufspüren und nutzen. Anhand des Anwendungsfalls des Quartiersentwicklungstools. Connected Urban Twins, o. O.
- Schubbe, N. et al. (2023): Urbane Digitale Zwillinge als Baukastensystem: Ein Konzept aus dem Projekt Connected Urban Twins (CUT). In: zfv 148(1), S. 14–23
- Stadt Wuppertal (o. J.): DigiTal Zwilling. <https://smart.wuppertal.de/projekte/digital-zwilling.php> (9.3.2026)
- Stadt Zürich (2020): Digitaler Zwilling: Verbindung von realer und virtueller Welt. <https://www.stadt-zuerich.ch/artikel/de/klick/digitaler-zwilling.html> (2.6.2026)
- Stadtverwaltung Herrenberg (o. J.) Digitaler Zwilling. <https://www.herrenberg.de/de/Rathaus/Buergerservice/Buergerservice-A-Z/Dienstleistung?view=publish&item=service&id=2802> (2.6.2026)

- Statista (2025): Urbanisierung und Städte weltweit. <https://de.statista.com/themen/7020/urbanisierung/#topicOverview> (2.6.2026)
- TAB (2023): Sustainable Cooling – nachhaltige Kühlungsstrategien. (Autor/innen: Hungerland, T. et al.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Kurzstudie 4, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000158817>
- TAB (2025): Leitlinien für den Einsatz generativer KI im TAB. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000188419>
- TU Dresden (2024): Smarte Lösung für Hochwasser-schutz: Forscher:innen der TU Dresden entwickeln eine App für die Simulation von Starkregenereignissen. <https://tu-dresden.de/bu/der-bereich/news/smarteloesung-fuer-hochwasserschutz-forscher-innen-der-tu-dresden-entwickeln-eine-app-fuer-die-simulation-von-starkregenereignissen> (9.3.2026)
- UN (o. J.): Goal 11: Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. United Nations, <https://sdgs.un.org/goals/goal11> (9.3.2026)
- VanDerHorn, E.; Mahadevan, S. (2021): Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. In: Decision Support Systems 145, Art. 113524, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- vc systems (2025): Helsinki: Automating Urban 3D Data for Living Digital Twins. virtualcitysystems GmbH, Berlin
- Wangermann, T. (2024): Werkzeuge für eine smarte Stadtentwicklung: Urbane Digitale Zwillinge. Smart City als Plattform organisieren. Konrad Adenauer Stiftung, Analysen & Argumente 535, Berlin
- Weil, C. et al. (2023): Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities. In: Sustainable Cities and Society 99, Art. 104862, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>

9 Anhang

9.1 Interviewpartner/innen

Name	Organisation
Giovanni Betti	Universität der Künste Berlin
Prof. Dr. Fabian Dembski	High-Performance Computing Center Stuttgart
Dr. Henning Füller	Humboldt Universität zu Berlin
Korbinian Kringer	Landeshauptstadt München
Emiliano Lupo	Henn GmbH, Berlin
Anonym	Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung der Freien und Hansestadt Hamburg
Dr. Sebastian Seelig	Buro Happold, Berlin
Lisa Stubert	Technologiestiftung Berlin
Ronny Zienert	Landesamt für Geobasisinformation Sachsen

9.2 Fokusgruppe: Teilnehmer/innen und Vorgehensweise

Tabelle 9.1 Demografische Auswahlkriterien

Geschlecht	Alter	Wohnort
w	36	Hamburg
w	65	Leipzig
m	47	Mannheim
m	31	München
m	38	Leipzig
m	51	zwischen Heidelberg und Mannheim
w	28	Mannheim

Die Fokusgruppe wurde am 28. August 2025 zwischen 18 und 20 Uhr online durchgeführt.

Ziel der Fokusgruppe

Durch die Fokusgruppe sollte herausgefunden werden, wie Nichtexpert/innen auf die Themen Stadtentwicklung, das Tool „Digitaler Zwilling“ in der Stadtentwicklung und mögliche Zukunftsszenarien schauen.

Vorgehensweise

Um dieses Ziel zu erreichen, hat das SINUS-Institut für Markt- und Sozialforschung Teilnehmer/innen für eine Fokusgruppe rekrutiert. Auswahlkriterien waren neben den in Tabelle 9.1 aufgeführten demografischen Kriterien eine ausgewogene Mischung hinsichtlich des Einkommens, des persönlichen Engagements für Stadtentwicklungs- und Nachhaltigkeitsthemen sowie des Bildungsstands und des Berufs.

Die Durchführung und Moderation sowie Ergebnisdokumentation oblag dem Team von SINUS. Nach einer Vorstellungsrunde wurde der persönliche Erfahrungsschatz zum Klimawandel abgefragt, und die Teilnehmenden konnten formulieren, was sie sich in Bezug auf Klimaanpassungsmaßnahmen zukünftig wünschen. Anschließend

wurde das Konzept des digitalen Zwillinges eingeführt. Ein Teil der Teilnehmenden war mit diesem Konzept bereits vertraut, jedoch nicht zwangsläufig mit der Anwendung im Bereich Stadtentwicklung. Da aus methodischen Gründen nur ein begrenzter Zeitraum für die Durchführung der Fokusgruppe vorgesehen war, wurden nur zwei der drei Szenarien (korrespondierend zu Szenario 1 und 2 in Kapitel 6.2 u. 6.3) anhand einer kurzen Zusammenfassung vorgestellt und diskutiert. In der Diskussion wurden spontane Assoziationen sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Szenarien erörtert. Abschließend wurden die jeweils diskutierten Aspekte zusammengeführt.

Die Ergebnisse der Fokusgruppe sind an geeigneten Stellen in den Studientext eingeflossen.

Diskutierte Szenarien

Alltag 2035: Leben mit dem Klimawandel und digitalen Zwillingen

Stellen Sie sich das Jahr 2035 vor: In deutschen Großstädten gehören Hitzewellen, Starkregen und Stürme zum Alltag. Stromausfälle, Wasserknappheit oder Verkehrschaos nach Unwettern sind nichts Ungewöhnliches mehr. Um damit umzugehen, setzen Städte stark auf Technik.

Jede Stadt hat eigene Pläne zur Klimaanpassung und nutzt dafür digitale Zwillinge. Das sind sehr genaue Computersimulationen einer Stadt. Sie verknüpfen viele Daten – etwa zu Luftqualität, Energieverbrauch oder Verkehr. Bevor eine Stadt neue Klima-Maßnahmen umsetzt, wird erst im digitalen Zwilling getestet, was diese bringen. Außerdem helfen digitale Zwillinge in Echtzeit bei Katastrophenwarnungen, beim Energiesparen oder zeigen, welche Viertel besonders finanzielle Unterstützung bei Klimaschutz brauchen.

Auch Bürgerinnen und Bürger machen mit: Am Computer oder über eine App können sie selbst ausprobieren, wie Bäume gegen Hitze helfen, wo neue Radwege sinnvoll wären oder welche Fußwege im Sommer am kühls-ten bleiben. Wer möchte, gibt eigene Daten weiter – zum Beispiel, wo man sich bewegt oder wie man sich fühlt – und verbessert so die digitalen Zwillinge.

Im Ergebnis begleiten digitale Zwillinge den Alltag – manchmal sichtbar in einer App, manchmal unbemerkt im Hintergrund. Sie tragen dazu bei, dass Städte trotz Klimakrise lebenswert bleiben.

Alltag 2035: Insellösungen und verpasste Chancen

Stellen Sie sich das Jahr 2035 vor: Viele Städte in Deutschland spüren die Folgen des Klimawandels deutlich - Hitzewellen, Starkregen, Hochwasser oder Stürme. Manche Regionen leiden stark, andere kaum. Deshalb fehlt ein gemeinsamer Wille, etwas zu verändern. Die Politik reagiert oft nur auf einzelne Katastrophen, anstatt rechtzeitig vorzusorgen.

Digitale Zwillinge könnten eigentlich helfen, Klimaschutzmaßnahmen vorher auszuprobieren oder besser vorherzusagen, wie sich der Klimawandel vor Ort auswirkt. Doch in der Realität werden sie nur in einigen Städten genutzt, meist in Bauämtern für die Planung von Plätzen oder Vierteln. In anderen Bereichen – etwa Verwaltung, Katastrophenschutz oder Bildung – fehlen klare Vorgaben und Akzeptanz.

Einige Bundesländer oder besonders betroffene Regionen entwickeln mit digitalen Zwillingen eigene Schutzmaßnahmen, etwa gegen Hitze oder an der Küste. Andere hängen weit zurück.

Hinzu kommt: Die nötigen Daten sind verstreut. Manche Daten gehören Unternehmen und kosten Geld, andere Daten werden lokal gesammelt und nicht geteilt. Das macht Vergleiche schwer und Vorhersagen teuer.

Insgesamt gleicht der Einsatz digitaler Zwillinge einem Flickenteppich: manche Städte sind im Jahr 2035 recht gut vorbereitet, andere dagegen verwundbar - und viele Chancen für besseren Schutz und mehr Lebensqualität werden verpasst.

9.3 Abbildungen

	Seite
Abbildung 2.1 Typische Hauptkomponenten urbaner digitaler Zwillinge	13
Abbildung 2.2 Konzept urbaner digitaler Zwilling	14
Abbildung 2.3 Bereitstellende Akteure von Daten zur Nutzung durch UDZ	16
Abbildung 2.4 Typische Darstellungsformen von UDZ	18
Abbildung 2.5 Verteilung von 135 digitalen Zwillingen in Deutschland in den Bereichen Infrastruktur, Bauen, Wohnen	20
Abbildung 3.1 Potenzielle Anwendungsfelder für urbane digitale Zwillinge	21
Abbildung 3.2 Nachhaltigkeitsdimensionen und Nachhaltigkeitsziele	24
Abbildung 5.1 Rollenmodell mit unterschiedlichen Verantwortungsebenen	36

9.4 Tabellen

Tabelle 2.1 Typische Daten für die Nutzung durch urbane digitale Zwillinge	15
Tabelle 2.2 Funktionalitäten von UDZ	17
Tabelle 3.1 Zuordnung von Anwendungsfeldern und -beispielen zu Nachhaltigkeitszielen	24
Tabelle 6.1 Schlüsselfaktoren für die künftige Entwicklung urbaner digitaler Zwillinge	43
Tabelle 9.1 Demografische Auswahlkriterien	57

9.5 Kästen

Kasten 2.1 Definition urbaner digitaler Zwilling	12
Kasten 3.1 Potenzielle Beiträge von UDZ zu Nachhaltigkeitszielen am Beispiel des ' Anwendungsfelds „Umwelt und Klima“	25
Kasten 3.2 Praxissteckbrief „Wasser- und Abwassermanagement inklusive Starkregen/Überflutung“	26
Kasten 3.3 Praxissteckbrief „Luftqualität/Hitze/Lärm“	27
Kasten 3.4 Praxissteckbrief „Energiemanagement auf Quartiers- und Stadtebene“	28
Kasten 3.5 Praxissteckbrief „Verkehrsplanung und Verkehrsmanagement“	29

