

Digitale Zwillinge

Potenziale in der Stadtentwicklung



IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat RS 5 „Digitale Stadt, Risikoversorgung und Verkehr“
Dr. Vilim Brezina
vilim.brezina@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities:

Dr. Sarah Brandt, Jens Henningsen, Steffen Hess, Dr. Andreas Jedlitschka
Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE
steffen.hess@iese.fraunhofer.de

Rene Hellmuth
Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation IAO
steffen.braun@iao.fraunhofer.de

Redaktion

Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities:
Dorothee Fricke, Karola Gowers (Korrektorat), DLR Projektträger

Stand

August 2023

Satz und Layout

Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities:
Sebastian Blunk, DLR Projektträger

Druck

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn
Gedruckt auf Recyclingpapier

Bestellungen

publikationen.bbsr@bbr.bund.de
Stichwort: Digitale Zwillinge

Bildnachweis

Titelbild: Angela Pfeiffer für Connected Urban Twins; S. 6: DLR-Institut für Systemleichtbau, CC BY-NC-ND 3.0; S. 8, 11, 17, 18, 22, 24, 26, 29, 33: eigene Darstellung; S. 9: Stadt Leipzig; S. 11: Nattavut – stock.adobe.com; S. 14.: Digital Built Britain/Construction Innovation Hub; S. 15: Raymond Inauen – stock.adobe.com; S. 16: Connected Urban Twins; S. 19: Stadtplanungsamt, Stadt Bamberg; S. 20: Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart; S. 21: MaxM / Wikipedia, CC BY-SA 4.0; S. 25: kunakorn – stock.adobe.com; S. 28: Stadt Kassel, Vermessung und Geoinformation; S. 30: Blue Planet Studio – stock.adobe.com

Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet.
Bitte senden Sie uns zwei Belegexemplare zu.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Digitale Zwillinge

Potenziale in der Stadtentwicklung

Das Projekt des Förderprogramms „Modellprojekte Smart Cities“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
2 Methodik	8
3 Digitaler Zwilling in der Smart City	10
3.1 Einordnung des digitalen Zwillings in der Stadtentwicklung	10
3.2 Fallbeispiele für die Anwendung	13
3.3 Herausforderungen bei der Umsetzung	22
4 Konzeptionelles Modell für den Aufbau eines kommunalen digitalen Zwillings	24
4.1 Ausgangssituation	24
4.2 Grundlagen	24
4.3 Bausteine und Komponenten	26
4.4 Prozessuale Anforderungen	27
5 Leitfaden für den Aufbau eines digitalen Zwillings	29
5.1 Voraussetzungen schaffen	29
5.2 Umsetzung	32
6 Fazit	34
Literatur	35



Zusammenfassung

Digitale Zwillinge sind für Kommunen ein vielversprechendes Werkzeug zur Adressierung kommunaler Herausforderungen. Ihre potenziellen Mehrwerte sind vielfältig, lassen sich doch mit ihnen unter anderem „Was-wäre-wenn“-Szenarien generieren oder Verwaltungshandeln datenbasiert unterstützen. Der Einsatz neuer Technologien und der Aufbau eines digitalen Zwillings sind jedoch keine einfachen Aufgaben. Ziel der Studie ist es, deutsche Städte und Gemeinden in die Lage zu versetzen, einen eigenen digitalen Zwilling als Umsetzungsprojekt anzugehen.

Zentral ist, die Entwicklung eines digitalen Zwillings als Prozess in einer Stadtverwaltung zu sehen, der möglichst bei der Umsetzung einzelner Anwendungen beginnt und das Potenzial bietet, über mehrere Anwendungsfälle auch fachbereichsübergreifend ausgeweitet zu werden. Anhand von Fallbeispielen werden in der vorliegenden Studie Anwendungen aufgezeigt und Erfahrungen geteilt. Aus den untersuchten Beispielen ergibt sich eine große Bandbreite an Entwicklungsständen des digitalen Zwillings vor allem in Deutschland. Dabei befinden sich viele Städte aktuell in der Konzeptionsphase und dem Schaffen von notwendigen Voraussetzungen (Datenbeschaffung, Kommunikation mit Stakeholdern, Aufbau der nötigen Infrastruktur).

Für den Einstieg in das Thema werden in Kapitel 3 Grundlagen, Komponenten und Anforderungen eines digitalen Zwillings dargestellt. Zudem wird eine mögliche Grobarchitektur vorgestellt, die grundlegende Komponenten enthält und deren jeweilige Funktionen aufzeigt, die als Basis für den Aufbau eines digitalen Zwillings genutzt werden kann. Wesentliche Voraussetzungen für diesen Aufbau sind neben der Verfügbarkeit von Ressourcen der interne Wissensaufbau sowie die Festlegung von Verantwortlichkeiten. Aus technischer Sicht ist die Basis eine vorhandene Infrastruktur, auf der Daten erfasst, übertragen und verarbeitet werden können. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an den digitalen Zwilling, die in Kapitel 4 in fünf Abschnitten (technische Infrastruktur, organisatorischer und strategischer Aufbau, Akteure, Data Governance und Anwendungsfälle) aufgezeigt werden.

Kapitel 5 enthält schließlich einen Leitfaden zum Aufbau eines digitalen Zwillings. Zu Beginn wird ein idealtypischer Ablauf von der Zielsetzung bis zur Umsetzung aufgezeigt. Dabei werden die wesentlichen Bausteine und Anforderungen aufgegriffen, Empfehlungen zur Vorgehensweise definiert und Leitfragen zur Orientierung vorgeschlagen. Anhand dieser Leitfragen wird eine zielgerichtete Vorbereitung auf die Umsetzung eines digitalen Zwillings ermöglicht. Dessen Umsetzung erfordert eine klare Organisation und die Identifikation eines Ziels, das mit dem der Anwendung erreicht werden soll. Die Gesamtheit der Herausforderungen, vor denen Kommunen aktuell stehen, bedingt, dass die Umsetzung von digitalen Zwillingen nur schrittweise zu erwarten ist.

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie kann nur prognostiziert werden, wie groß deren Potential tatsächlich ist. Daher zeigen sich die Mehrwerte von digitalen Zwillingen in der kommunalen Praxis bislang nur sehr selten – erste Beispiele lassen aber bereits das Potenzial für die Stadtentwicklung erahnen. Auch sind die Grenzen des digitalen Zwillings heute noch nicht absehbar. Wie viele anwendungsfallspezifische digitale Zwillinge in Kommunen entwickelt werden, wie weit diese miteinander verknüpft sind und dadurch wiederum übergeordnete Zwillinge im Sinne eines „Systems aus Systemen“ bilden und wie viele Systeme und Daten darin aufgenommen werden, kann heute noch nicht abschließend beantwortet werden.

Die Grenzen digitaler Zwillinge werden schlussendlich maßgeblich von der Leistungsfähigkeit und Datenkompetenz der Kommunen beeinflusst. Dies betrifft beispielsweise auch Fragen wie hoch der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) sein wird oder inwieweit der digitale Zwilling auf die tatsächlichen Entscheidungsabläufe Einfluss haben soll. Sicher ist, dass digitale Zwillinge mittel- und langfristig tiefgreifende Veränderungen in den Kommunen bewirken und zum obligatorischen Bestandteil der Stadtentwicklung der Zukunft gehören werden, weshalb eine frühzeitige Beschäftigung mit Voraussetzungen und Anwendungsfällen eine wichtige Investition in die künftige Handlungsfähigkeit der integrierten Stadtentwicklung darstellt.

1 Einleitung

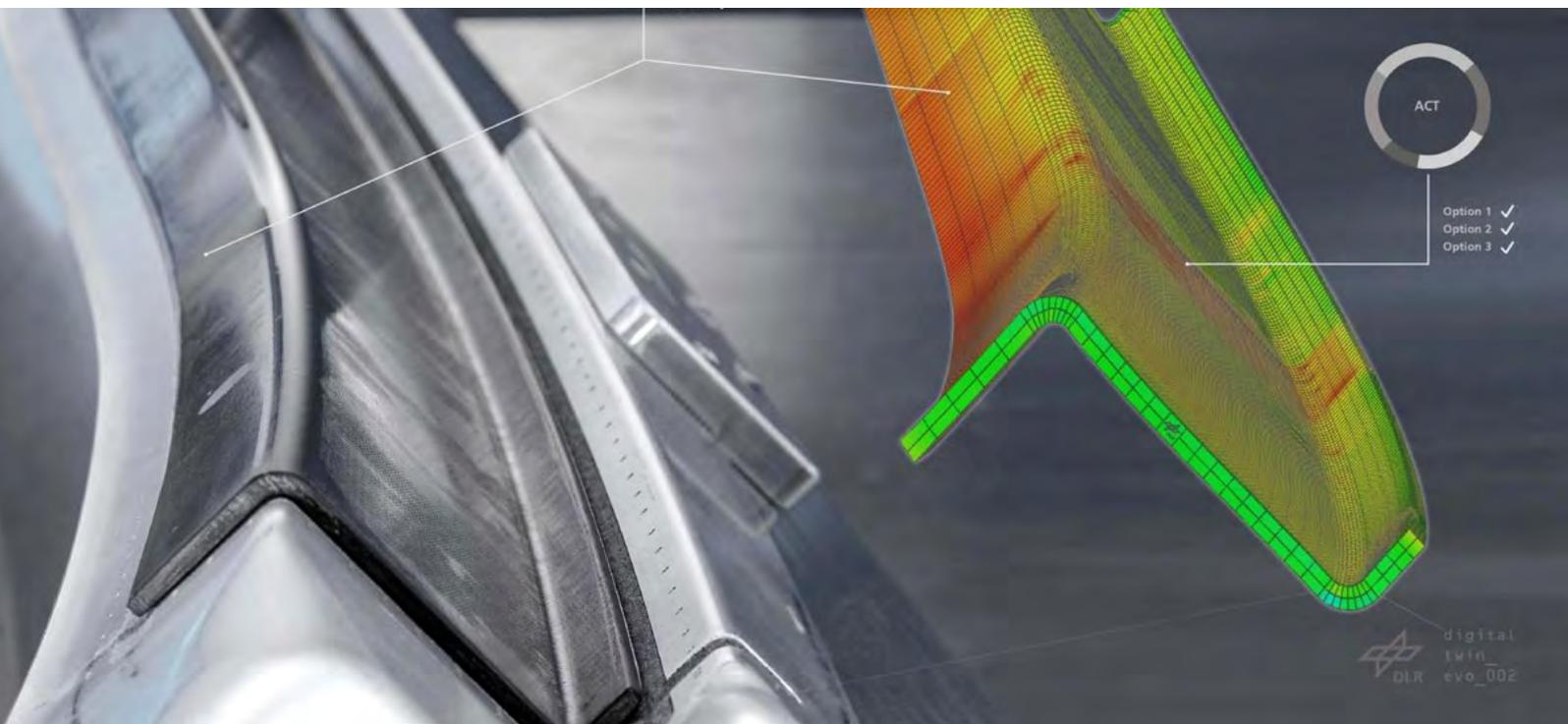
Die Entstehung digitaler Zwillinge geht auf die US-amerikanische Raumfahrtindustrie der 1960er-Jahre zurück, insbesondere auf die digitale Abbildung von Raumfahrzeugen. Inzwischen hält das Konzept Einzug in vielen Bereichen der Wirtschaft und Wissenschaft, der Fertigungsindustrie, der Medizin und schließlich auch in der Stadtentwicklung. In der Raumfahrt war der digitale Zwilling durch drei Dimensionen gekennzeichnet: der physischen, der virtuellen und der Verbindungsdimension. Dabei galt er als das virtuelle Abbild eines physischen Objekts im Digitalen, der mit anderen digitalen Zwillingen in Verbindung steht (vgl. Ricci et al. 2022). In der Stadtentwicklung untersucht man unter anderem das Potenzial von digitalen Zwillingen für mehr Nachhaltigkeit in der Stadt (vgl. Vestner 2022; Triangulum-Project 2023).

Die Aussicht auf Effizienzsteigerung, Standardisierung, aktive Einflussnahme, Optimierung und Simulation haben dazu geführt, dass Stadtverwaltungen den digitalen Zwilling zunehmend auch in der integrierten Stadtentwicklung einsetzen wollen. Digitale Abbilder der Stadt, einzelner Stadtquartiere aber auch städtischer Prozesse sind dabei ein wesentlicher Bestandteil des digitalen Zwillinges von Kommunen. Digitale Zwillinge sollen auf Basis von vorhandenen beziehungsweise verfügbar gemachten Daten aus einzelnen Fachbereichen sowie aus Messungen, Sensoren und

Drittssystemen entstehen. Mit der fortschreitenden Digitalisierung in den Städten und dem damit häufig einhergehenden fachbereichsübergreifenden Datenmanagement werden wichtige Voraussetzungen für den Aufbau digitaler Zwillinge zunehmend erfüllt. Allerdings sind Städte häufig von komplexen, miteinander interagierenden Systemen geprägt, die sich nicht eindeutig voneinander abgrenzen lassen. Diese städtische Komplexität abzubilden, die Begriffsdefinition sowie die Anforderungen an einen digitalen Zwilling zu definieren, stellt eine wesentliche Herausforderung für dessen Umsetzung dar. Daraus ergibt sich auch die Diskussion, ab wann von einem digitalen Zwilling gesprochen werden sollte: Ist bereits ein digitales 3D-Modell einer Stadt ein digitaler Zwilling oder gilt dies erst, wenn Daten verarbeitet werden wie zum Beispiel bei Erreichbarkeitsanalysen oder Starkregensimulationen? Die vorliegende Studie greift diese Problematik auf, um die für den Aufbau von digitalen Zwillingen notwendige fachbereichsübergreifende Zusammenarbeit zu etablieren und mögliche Abgrenzungs- und Definitionshürden zu überwinden.

Der digitale Zwilling ist aktuell ein wichtiges internationales Forschungsthema, das nicht nur in der Stadtentwicklung auftaucht. Bereits von Lim (2020) als „Hype oder Hoffnung“ bezeichnet und in und vom Marktforschungsunternehmen

Abbildung 1: Nutzung des digitalen Zwillinges zur Bewertung von Fertigungstoleranzen im Flugzeugbau (vgl. Hein et al. 2018) |
Quelle: DLR-Institut für Systemleichtbau, CC BY-NC-ND 3.0



Gartner zum „Top 10 Technologietrend 2017“ (Panetta 2016) gewählt, sorgte er seitdem für anhaltende Begeisterung. Dennoch ist der Begriff „digitaler Zwilling“ jenseits der Fachöffentlichkeit vergleichsweise unbekannt, wie die Studie von PwC aus dem Jahre 2018 (Bevölkerungsbefragung) zeigte. Lediglich 26 % der Befragten (N = 1.000) hatten schon einmal etwas von einem digitalen Zwilling gehört, konnten aber nicht erklären, was er ist (vgl. Wollschläger 2018). Eine Studie von Detecon zeigt, dass 48 % der darin befragten Unternehmen (N = 170) den digitalen Zwilling als Instrument kennen und lediglich 10 % der Unternehmen der Begriff unbekannt ist (vgl. Weber/Grosser 2019). In den Kommunen ist der digitale Zwilling heute vereinzelt in der Stadtverwaltung geplant oder im Aufbau, der Begriff selbst ist aber zum Beispiel in den einzelnen Fachämtern oder bei Bürgerinnen und Bürgern noch eher wenig durchdrungen.

Die neuen Möglichkeiten, die sich durch die Verschmelzung von digitaler und realer Welt ergeben, bieten ein enormes Potenzial für die Verbesserung und Beschleunigung von Prozessen und Verfahren der Stadtentwicklung. Hierzu sind insbesondere verbesserte Monitoringsysteme, evidenzbasierte Entscheidungen oder Optimierungen kommunaler Verfahren als Beispiele zu nennen (vgl. Ricci et al. 2022). Dabei ist die Modellierung und Visualisierung komplexer Prozesse ebenso möglich wie die

Unterstützung der Öffentlichkeits- und Bürgerbeteiligung (vgl. Dembski et al. 2020). Die Erwartungen von Kommunen und Stakeholdern, die neue Technologie möglichst zügig in die Anwendung zu bringen, sind entsprechend hoch. Denn obgleich digitale Zwillinge in der Forschung bereits intensiv diskutiert werden, ist die Entwicklung und Umsetzung eines digitalen Zwillings in deutschen Kommunen noch weitgehend Pionierarbeit (Blankenbach 2022). Dabei stellt der typischerweise sehr komplexe Umsetzungsprozess viele Kommunen vor Herausforderungen, die in der Praxis überwunden werden müssen. Auch in den vom Bund geförderten Modellprojekten Smart Cities (MPSC) ist der digitale Zwilling ein omnipräsentes Thema und steht in einigen Modellprojekten sogar im Zentrum der jeweiligen Smart-City – beziehungsweise Digitalisierungsstrategie.

Nicht zuletzt deshalb widmet sich die vorliegende Studie der Aufarbeitung der Begrifflichkeiten, der Zusammenstellung erster praktischer Erfahrungen aus ausgewählten Fallstudien und schließlich der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen. Zentral dabei ist die Frage, welchen Beitrag digitale Zwillinge in der integrierten Stadtentwicklung leisten können. Ziel dieser Studie ist es daher, Kommunen zu befähigen, das Projekt digitaler Zwilling problem- und bedarfsorientiert angehen zu können.



Die neuen Möglichkeiten, die sich durch die Verschmelzung von digitaler und realer Welt ergeben, bieten ein enormes Potenzial für die Verbesserung und Beschleunigung von Prozessen und Verfahren der Stadtentwicklung.



2 Methodik

Für die Durchführung der Untersuchung wurde die in Abbildung 2 dargestellte Vorgehensweise gewählt. Zunächst wurde die Ausgangssituation mittels Desk Research und der Literaturrecherche im Schneeballsystem analysiert. Dabei wurde ein aktueller Stand bezüglich der Umsetzung digitaler Zwillinge in den MPSC erfasst. Grundlage dafür waren die Projektanträge und bereits vorhandene Smart-City-Strategien der Kommunen sowie die vorhandene Literatur zu digitalen Zwillingen. Darüber hinaus wurden auch weitere (nicht-MPSC) Städte untersucht, die sich mit dem digitalen Zwilling befassen. Für die Suche wurden vorwiegend drei Schlagwörter verwendet: „Digitaler Zwilling“, „Digital Twin“ und „Smart City“. Ziel war es, offene Fragen und potenzielle Interviewpartnerinnen und Interviewpartner zu identifizieren.

Anschließend wurden bundes- und europaweit neun Expertinnen und Experten zu semistrukturierten Interviews aus folgenden Städten eingeladen.

- **Deutschland:** Hamburg, Mönchengladbach, Freiburg, Kirchheim, Haßfurt und Herrenberg
- **Europa:** Zürich, Rotterdam, und Helsinki

Die Interviews wurden im Zeitraum Juni bis Juli 2022 mit Personen durchgeführt, die maßgeblich

an der Strategieentwicklung und Umsetzung eines digitalen Zwillings in ihrer Stadt beteiligt sind. An der Befragung nahmen vorwiegend Vertreterinnen und Vertreter der MPSC der ersten (2019) und zweiten Staffel (2020) teil, da diese zum Zeitpunkt der Erhebung bereits Projekte zum digitalen Zwilling umsetzten (Planung, Konzeption). Für die Interviews wurden fünf Leitfragen formuliert:

1. Welche Potenziale für die Beschleunigung von Stadtplanungsprozessen – wie zum Beispiel die kommunale Bauleitplanung oder artverwandte Verfahren – können gehoben werden?
2. Wo liegen die Grenzen von digitalen Zwillingen in der Anwendbarkeit?
3. Welche Verfahrensschritte können durch den Einsatz von digitalen Zwillingen ersetzt, vereinfacht oder beschleunigt werden?
4. Gibt es durch den Einsatz von digitalen Zwillingen weitere Vorteile (z. B. höhere Zufriedenheit der Stadtgesellschaft durch transparentere Prozesse)?
5. Welche Schritte sind zur Umsetzung des digitalen Zwillings in der integrierten strategischen Stadtentwicklung notwendig?

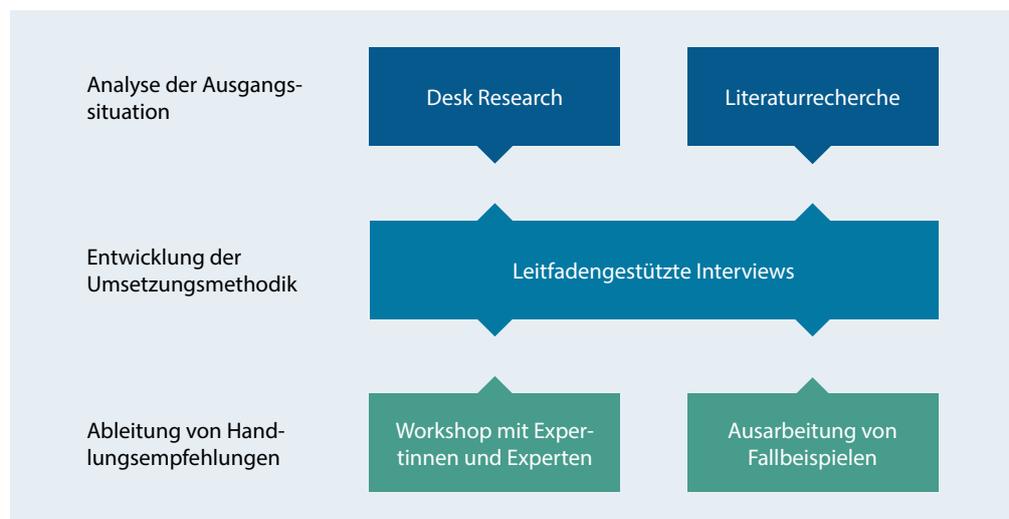


Abbildung 2: Vorgehensweise | Quelle: eigene Darstellung



Bürgerbeteiligung mit Hilfe eines digitalen Zwillings in Leipzig | Quelle: Stadt Leipzig

Die interviewten Personen kamen aus unterschiedlichen Bereichen wie Geodatenmanagement, IT oder Stadtplanung:

- Direktor für Geomatik und Vermessung, Stabstellenleitung Geodatenmanagement, Geoinformatikerin mit Projektleitung digitaler Zwillings
- Technical Operator
- Programmmanager, Gründer eines digitalen Zwillings, Vertreter einer Hochschule
- Leitungsposition zur Datenplattform und Referent aus der Wirtschaftsförderung

Die Leitfragen wurden in ein Set von Interviewfragen integriert und erweitert, um einen möglichst umfassenden Eindruck von der Vorgehensweise der Städte zu erhalten. Der entwickelte Leitfaden gliederte sich in drei Themenblöcke:

Strategie, Umsetzung und Evaluierung des digitalen Zwillings. Vor jedem Interview wurden die Personen nach einer für sie passenden Definition des digitalen Zwillings gefragt. Die Antworten aus den Interviews wurden thematisch zusammengefasst, woraus das Projektteam Handlungsempfehlungen ableitete. Ferner wurde ein Konsolidierungsworkshop mit verschiedenen Experten aus Kommunen, Unternehmen und Forschung durchgeführt. Ziel war es, Untersuchungsergebnisse und Methodik kritisch zu diskutieren und anhand von Leitfragen ein Feedback einzuholen. Die Rückmeldung floss schließlich in die Erstellung der Endfassung der Studie ein. Die Auswahl der Fallbeispiele basiert schließlich auf einer Mischung aus größeren und kleineren Kommunen in Deutschland, ergänzt durch europäische und internationale Fallbeispiele.

3 Digitaler Zwilling in der Smart City

3.1 Einordnung des digitalen Zwillings in der Stadtentwicklung

In der Literatur und in der Praxis findet sich derzeit ein breites Spektrum an Definitionen und Interpretationen des Begriffs „digitaler Zwilling“. Das Verständnis des Zwillings variiert nicht nur zwischen den Städten selbst, sondern bereits mit den verschiedenen Blickwinkeln von Stakeholdern innerhalb einer Stadt. Ebenfalls ist unklar, ab wann von einem digitalen Zwilling gesprochen werden kann (vgl. Shahat et al. 2021). Ist die Datenerfassung für den digitalen Zwilling bereits eine seiner Bestandteile? Umfasst er mehr als nur ein 3D-Abbild der Stadt? Wird es nur einen digitalen Zwilling der Stadt geben oder werden es mehrere sein können, die in einer interaktiven Beziehung zueinanderstehen? Um die vielschichtigen Inhalte zu konsolidieren, die mit dem Begriff „digitaler Zwilling“ verbunden sind, wurde für die vorliegende Studie eine Definition aus der Literatur abgeleitet (Austin et al. 2020; Dembski et al. 2020; Deren et al. 2021; van der Valk et al. 2021), die im Folgenden erläutert wird:

Ein digitaler Zwilling einer Stadt ist ein dynamisches digitales Abbild, welches sich auf die Ganzheit oder einen anwendungsfallspezifischen Teil einer Stadt bezieht. Dazu gehören unter anderem die physische Bausubstanz, Infrastrukturanlagen und -einrichtungen sowie städtische Prozesse, Systeme und Daten unter Einbeziehung von Geräten des Internet der Dinge (IoT) und Informationsfeedback der Bürgerschaft.

In einem digitalen Stadtzwilling werden anwendungsspezifische Funktionen intelligent und dynamisch integriert (z. B. KI, maschinelles Lernen und Datenanalyse), wobei ein kontinuierlicher und systematischer Abgleich zwischen der Realität und dem digitalen Abbild erfolgt. Dadurch wird es möglich, Simulationen durchzuführen, den digitalen Zwilling aus verschiedenen Quellen lernen zu lassen und den aktuellen und zukünftigen Zustand seiner physischen Gegenstände darzustellen.

Der digitale Zwilling ist eine visuelle Darstellung der Stadt, der sie bildenden Objekte, Infrastrukturen und Prozesse sowie ihrer aktuellen Zustände. Dabei handelt es sich nicht um ein einfaches Abbild, sondern um die Erfassung und Verarbeitung von Daten aus der physischen und der virtuellen Welt sowie die Darstellung ihrer Verbindung. Das Zeichnen des Abbilds ist allerdings nur soweit möglich, wie es die kommunal verfügbaren und nutzbaren Daten zulassen. Durch die Interaktion mit den Bürgerinnen und Bürgern wird das Bild schließlich um eine zusätzliche Ebene erweitert. Die Vielzahl der Akteure in städtischen Systemen sind eine wesentliche Komponente, die den digitalen Zwilling der Stadt von dem der Industrie unterscheidet (siehe Abbildung 3). Daher ist es erforderlich, zusätzliche Prozesse und Dienste in den digitalen Zwilling zu integrieren, die die Bedürfnisse und die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern berücksichtigen. Der digitale Zwilling kann als ein „Container“ verstanden werden, der Daten für Analysen in der virtuellen Welt bereitstellt. Im Idealfall können diese Daten in die



In einem digitalen Stadtzwilling werden anwendungsspezifische Funktionen intelligent und dynamisch integriert (z. B. KI, maschinelles Lernen und Datenanalyse), wobei ein kontinuierlicher und systematischer Abgleich zwischen der Realität und dem digitalen Abbild erfolgt. Dadurch wird es möglich, Simulationen durchzuführen, den digitalen Zwilling aus verschiedenen Quellen lernen zu lassen und den aktuellen und zukünftigen Zustand seiner physischen Gegenstände darzustellen.

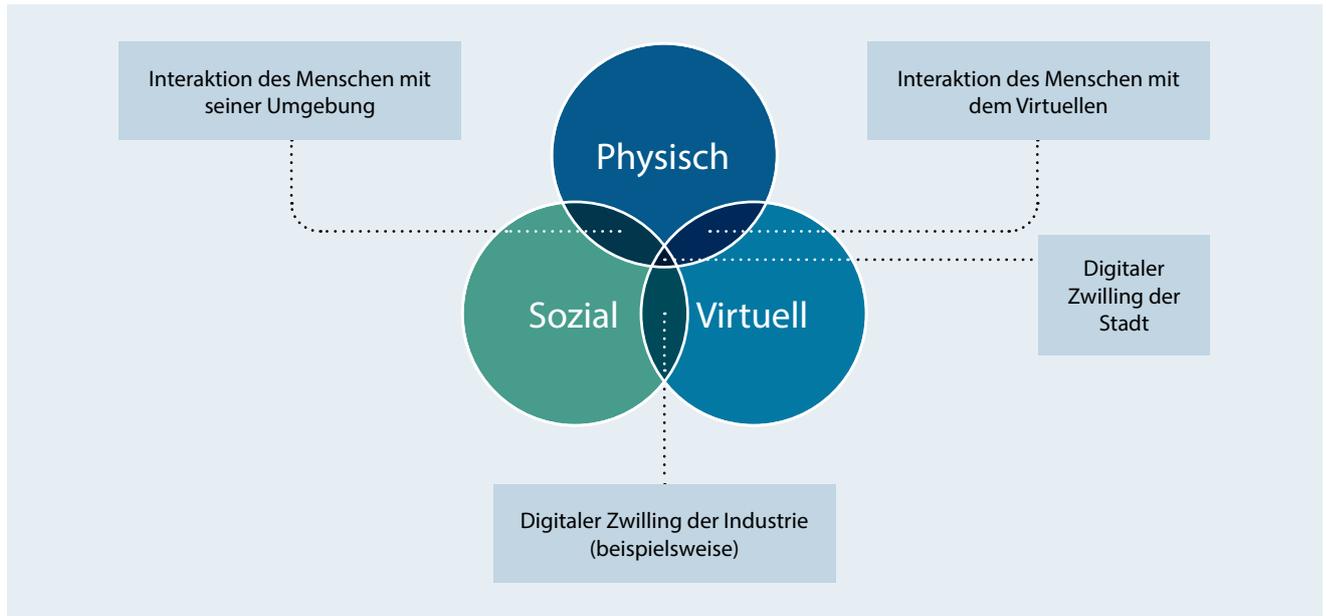


Abbildung 3: Komponenten des digitalen Zwillings der Stadt | Quelle: eigene Darstellung

physische Welt übertragen oder zur Steuerung von Objekten oder Infrastrukturen in der physischen Welt (in Echtzeit) genutzt werden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Verknüpfung aller relevanten Daten mit Fachwissen, was nur durch eine verstärkte Vernetzung und Zusammenarbeit zwischen Akteuren verschiedener Fachbereiche möglich wird. Der Aufbau und die Weiterentwicklung eines digitalen Zwillings in einer Stadt sind somit als **fortlaufender Prozess** zu verstehen.

Neben den Potenzialen eines digitalen Zwillings zur Erfassung und Vernetzung vieler in der Stadt wirkender Systeme, wird gleichzeitig deutlich,

dass nicht jeder Aspekt der Stadt digital abbildbar ist. Daher ist es aus heutiger Sicht empfehlenswert, zunächst anwendungsspezifische digitale Zwillinge aufzubauen. Dabei ist eine dynamische Verbindung zwischen dem realen Objekt und der digitalen Repräsentation nicht immer erforderlich, erstrebenswert oder möglich. Insgesamt ist ein digitaler Zwilling als **ein Werkzeug** einzuordnen, das als Hilfsmittel zur Umsetzung kommunaler Aufgaben und zur Erstellung evidenzbasierter Entscheidungsgrundlagen in Form von Simulationen dient. Zusammenfassend lässt sich Roland van der Heijdens (Stadt Rotterdam) Erklärung zum digitalen Zwilling anführen, der

Ein digitaler Zwilling lässt sich mit Legosteinen vergleichen, die sich über Steckverbindungen auf verschiedene Weise zusammensetzen lassen | Quelle: Nattavut – stock.adobe.com



den digitalen Zwilling mit Legosteinen vergleicht. Die Daten bilden die einzelnen Legosteine ab, die auf verschiedene Weise (je nach Bedarf) zusammengesetzt werden können. Wichtig sind dabei die Steckverbindungen, die ein Zusammensetzen der Legosteine ermöglichen (siehe Kapitel 4). Zusammengesteckt bilden sie dann den digitalen Zwilling für verschiedene Anwendungsfälle.

Als querschnittsorientierte kommunale Aufgabe ist die Stadtplanung besonders herausfordernd. Als querschnittsorientierte Disziplin dient sie der Ordnung und Lenkung der städtebaulichen Entwicklung. Für diese öffentliche Aufgabe mit ausgeprägter Gemeinwohlorientierung bietet der digitale Zwilling an der Schnittstelle zwischen Staat und Gesellschaft große Potenziale. Gleichzeitig sind digitale Zwillinge nicht nur als Ergänzung zu bestehenden Instrumenten der Stadtplanung zu verstehen, sondern verändern

womöglich auch das Verständnis von Planung selbst. Der Zeithorizont im Rahmen der Bauleitplanung, aber auch informeller städtebaulicher Konzepte ist mit 20 bis 30 Jahren langfristig ausgerichtet. Statische und dynamische Daten, die in digitale Zwillinge eingespeist und verarbeitet werden können, bilden für Städte eine Brücke zwischen unterschiedlichen Zeitskalen. Dadurch wird es möglich, sowohl kurzfristige Veränderungen und Dynamiken in der Stadt abzubilden und bei der Aufstellung von Plänen zu berücksichtigen, als auch schneller auf Veränderungen in der Stadtentwicklung reagieren zu können. Grundsätzlich kann die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Handlungsfeldern neue Erkenntnisse für die Stadtentwicklung und -planung liefern und die Bearbeitung ressortübergreifender Fragestellungen ermöglichen. Zusätzlich könnte es möglich werden, Wirkungszusammenhänge mit bisher unbekanntem Mustern zu erkennen.



Ein **Geographisches Informationssystem (GIS)** ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden (vgl. de Lange 2020).

Building Information Modeling (BIM) ist eine Methode im Bauwesen, die das Erzeugen und Verwalten von digitalen Gebäudemodellen mit Hilfe von Software ermöglicht und als Entscheidungsgrundlage zur Unterstützung von Planungs-, Bau- und Betriebsprozessen dient. Ein digitales Gebäudemodell enthält Informationen zu physischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks. Die Gebäudemodelle stellen eine Informationsdatenbank über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks dar. Eine grundlegende Voraussetzung für BIM ist die Zusammenarbeit der am Lebenszyklus des Bauwerks Beteiligten, um die gemeinsam verfügbaren Gebäudeinformationen aus der jeweiligen Perspektive zu erstellen, zu bewerten, zu ändern (vgl. DIN EN 19650-1).

City Information Modeling (CIM) ist als Analogie zu BIM im Städtebau zu sehen. CIM bietet Möglichkeiten zur Modellierung und Visualisierung auf verschiedenen Ebenen und Maßstäben. Die 3D-Elemente einer Stadt und die damit verbundenen Informationen werden in CIM dargestellt. Ähnlich wie BIM ist CIM unter anderem eine Datenbank mit Informationen über die Stadt, auf die alle am Entscheidungsprozess Beteiligten Zugriff haben. Sie enthält alle planungsrelevanten Daten (Geografie, Geometrie etc.) und verknüpft diese miteinander, um Analysen durchzuführen. Analog zum BIM-Modell werden die Informationen der CIM-Datenbank ausgewertet, verändert und bei Bedarf aktualisiert. Während BIM die Methode vom Bau über den Betrieb bis zum Abriss eines Gebäudes ist, ist CIM die Methode zur Modellierung der Stadt (vgl. Souza/Bueno 2022).



Das Zusammenspiel verschiedener digitaler Zwillinge, die in unterschiedlichen Fachbereichen entstehen, ist von entscheidender Bedeutung. Daher ist es wichtig, Schnittstellen und Interoperabilitäten bereits bei der Erstellung eines ersten anwendungsspezifischen digitalen Zwillinges zu berücksichtigen, um zukünftige Synergien nutzen zu können. Dies kann im Kontext von digitalen Zwillingen für Smart Cities sowohl innerhalb der eigenen Stadt als auch bei der Zusammenarbeit mit anderen Städten von zentraler Bedeutung sein.

3.2 Fallbeispiele für die Anwendung

Beispiele für den Einsatz von digitalen Zwillingen finden sich sowohl in Deutschland als auch auf europäischer und internationaler Ebene. In Europa sind dabei insbesondere die Städte Helsinki (Finnland), Rotterdam (Niederlande), Stockholm (Schweden), Wien (Österreich), Cambridge (England), Zürich (Schweiz) und die Region Flandern (Niederlande) zu nennen. Weltweit sind Singapur, Wellington (Neuseeland) oder auch Amaravati (Indien) als Beispiele hervorzuheben. Die internationalen Beispiele unterscheiden sich jedoch in ihren Ansätzen deutlich von denen in Europa und Deutschland. Im Folgenden werden einige Beispiele vorgestellt und vertieft.

- Die Stadt **Amaravati** in Indien wird gegenwärtig von Grund auf neu errichtet. Ihre Entwicklung wird von Beginn an durch einen digitalen Zwilling begleitet, indem ein Abbild der gewünschten Bebauung der Stadt vorab virtuell konstruiert wird. Aspekte der nachhaltigen Stadtentwicklung werden unmittelbar berücksichtigt und mögliche Planungsentscheidungen vor der Umsetzung simuliert. Durch diesen iterativen Planungsablauf können sich neue Erkenntnisse zur Funktionsfähigkeit einer Stadt ergeben, um zukünftige Planungen zu optimieren. Technisch wird der digitale Zwilling von Amaravati auf der Smart-World-Pro-Plattform dargestellt (vgl. Jansen 2019).

Stadt	Vorhaben/Umsetzung
 Amaravati (Indien)	Stadt befindet sich im Aufbau und digitale Zwillinge werden von Beginn an integriert
 Cambridge (UK)	Digitaler Zwilling wird in abgegrenzten Bereichen eingesetzt (Universität)
 Wellington (NZL)	3D-Abbild der Stadt mit Anwendungsbeispielen mit Echtzeitsensorik
 Helsinki (FIN)	Digitaler Zwilling des Stadtteils Kalasamata, der verschiedene digitale Dienstleistungen anbietet
 Rotterdam (NL)	Der digitale Zwilling als zentrale Kooperationsplattform
 Zürich (CH)	Der digitale Zwilling für eine responsive Stadt

Tabelle 1: Übersicht der europäischen und internationalen Fallbeispiele | Quelle: eigene Darstellung

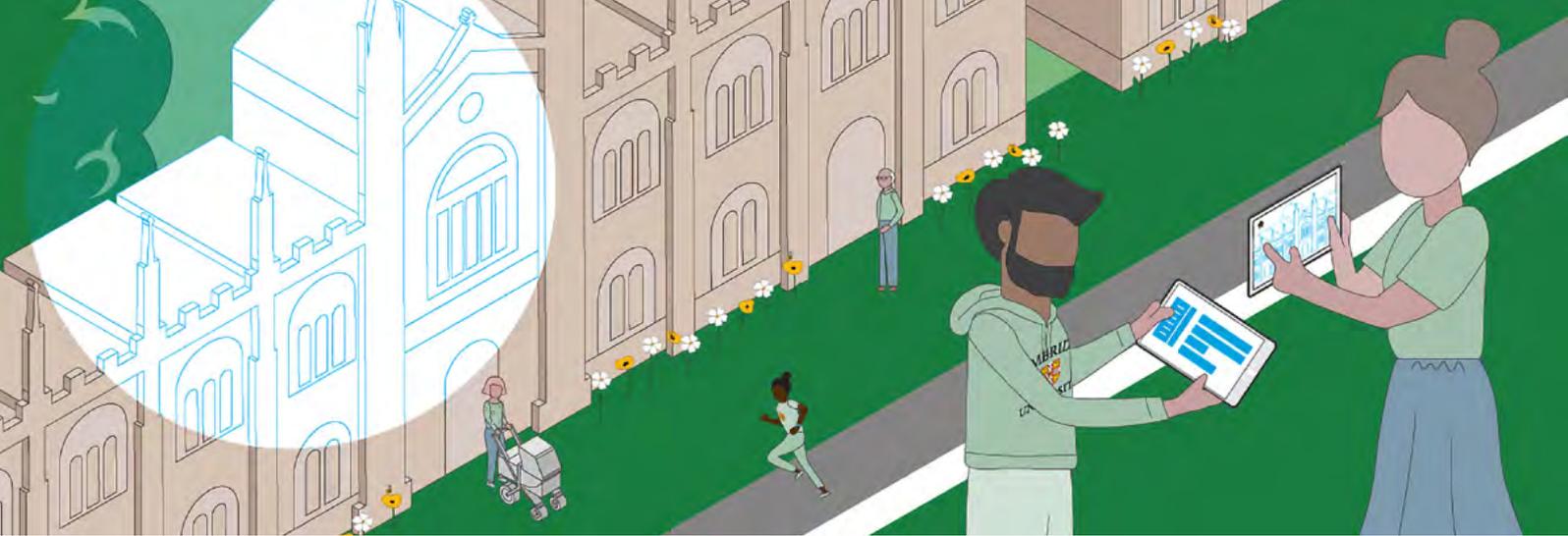


Abbildung 4: Der digitale Zwilling vom Campus der University of Cambridge soll bei Managementaufgaben unterstützen | Quelle: Digital Built Britain/Construction Innovation Hub

- In **Cambridge** wurde der digitale Zwilling von einem Konsortium aufgebaut, das aus einem Unternehmen für Modellierungen und Datenerfassung, zwei Universitäten, einem weiteren akademischen Team und einer Beratungsfirma bestand. Der digitale Zwilling bildet den Campus der Universität ab und soll bei Managementaufgaben unterstützen. Im Zuge der Entwicklung wurde ein Konzept zur Systemarchitektur entwickelt, das speziell für die Gebäudeebene und die Stadtebene gedacht ist (vgl. Lu 2020).
- In **Wellington** (Neuseeland) wurde der Prozess schon früh klar definiert:
 1. Definition des Ziels – Festlegung des Umfangs und der Richtung
 2. Verfügbarkeit von Daten aus den Bereichen, die der digitale Zwilling abbilden soll
 3. Beginn mit einem kleinen Projekt/Rahmen
 4. Erweiterung des Projekts/Rahmens

Dabei wurde ebenfalls ein 3D-Stadtmodell erzeugt (mithilfe der Unreal Engine ²), das dann mit IoT-Sensoren eine Verbindung zwischen der physischen und der virtuellen Welt ermöglicht. Seit August 2022 ist ein funktionsfähiger Prototyp verfügbar, der die Stadt dreidimensional abbildet. Dabei werden Daten von staatlichen und privaten Organisationen zusammengebracht, die über Sensorik Echtzeitdaten im digitalen Zwilling anzeigen. Dies umfasst insbesondere die Bewegung von Fahrrädern und Fußgängern sowie die Messung

von Temperaturen und Luftqualität im Stadt- raum.

Bei den Fallbeispielen im europäischen Rahmen liegen verschiedene Strategien und Ziele für den Aufbau eines digitalen Zwillings zu- grunde.

- In **Helsinki** (Stadtteil Kalasatama) wurde ein digitaler Zwilling realisiert, der verschiedene Dienste anbietet und damit zu effizienteren Stadtplanungsprozessen beitragen soll. Das 3D-Stadtmodell (City Model), das frühzeitig entwickelt wurde, besteht aus zwei zentralen Komponenten: (1) einer semantischen Anreicherung mit CityGML³, einem standardisierten Austauschformat für Geodaten im urbanen Kontext, und (2) einer Anreicherung mit verschiedenen Anwendungsfällen.

Derzeit werden bereits mehrere Projekte umgesetzt, wie Helsinki 3D cityloader, Minecraft-Helsinki3D+, OpenCity Planner und Smart Kalasatama. Zusammen mit der Stadt Tallinn in Estland wird aktuell der Green Digital Twin mit den Schwerpunkten Biodiversität und Partizipation umgesetzt. Als Grundlage dient eine Digital- und Datenstrategie, die Themen wie Datenquellen, Datennutzung, Datenverfügbarkeit und Offenheit der Daten als Basis für den digitalen Zwilling aufgreift. Zudem sind klar definierte Verantwortlichkeiten und Strukturen innerhalb des Projektteams vorhanden. In der Weiterentwicklung des digitalen Zwillings werden schritt-

² <https://www.unrealengine.com/en-US>
<https://buildmedia.com/work/wellington-digital-twin>

³ Der CityGML-Standard definiert ein konzeptionelles Modell und Austauschformat für die Repräsentation, Speicherung und den Austausch von virtuellen 3D-Stadtmodellen.

weise die städtischen Prozesse in den digitalen Zwilling integriert.

- **Rotterdam** fokussiert sich bei der Umsetzung des digitalen Zwillings auf die zugrundeliegende Urban Data Platform. Die Plattform wird dabei als zentrale Drehscheibe verstanden, bei der die Fachbereiche der Stadt die erforderlichen Daten als Open Data bereitstellen ohne dabei ihre bereichsspezifischen Prozesse zu ändern. Analysen und Simulationen auf Basis der Datensätze finden komplett im digitalen Zwilling statt. Dementsprechend basiert das Konzept von Rotterdam auf drei Schichten:
 - den Datenquellen (Geodaten zu Gebäuden, zum öffentlichen Raum sowie entsprechender Sensorik etc.),
 - der generischen Plattform (Grundfunktionalitäten des digitalen Zwillings) und
 - den Anwendungen zur Schaffung von Lösungen in der physischen Welt.

Während in der Vergangenheit Rotterdam 3D entwickelt wurde (2010 bis 2018), liegt der Fokus nun auf Open-Data-Standards und Interoperabilität. Der digitale Zwilling soll die verschiedenen digitalen Lösungen miteinander verbinden und einen Mehrwert schaffen. Die Stadt setzt dabei auf eine starke Zusammenarbeit zwischen dem öffentlichen und dem privaten Sektor. Prozessual skizzierte Rotterdam dabei das Vorgehen in Form eines Proof-of-Concept (Machbarkeitsstudie) als Basis des Prototyps. Fester Bestandteil sind dabei festgelegte Entwicklungszyklen

für die Evaluierung der Strategie in Form von Lessons Learned. Dazu gehört auch die gezielte Einbeziehung von Unternehmen in die Entwicklung des digitalen Zwillings.

- **Zürich** hat den digitalen Zwilling unter dem Begriff der „Responsive City“ etabliert. Die Idee ist, eine Vielzahl an digitalen Werkzeugen zu entwickeln, um Arbeitsweisen und -prozesse zu verbessern. Die Basis ist das 3D-Stadtmodell, das seit Ende 2018 zur Verfügung steht. Im Hintergrund werden Fachdaten in den digitalen Zwilling eingespeist, die für einzelne Anwendungsfälle benötigt werden. Die Fachämter entscheiden dabei selbst, ob ein Anschluss an den digitalen Zwilling für sie sinnvoll ist. Dabei identifiziert die Stadt auch, welche Daten für eine gute Visualisierung benötigt werden. Ebenfalls wird bei dem Vorgehen evaluiert, welche Daten zu einem tatsächlichen Mehrwert beitragen. Es werden eine Reihe von Projekten realisiert, die unter anderem Abbilder des Züricher Straßenraums oder der historischen Bausubstanz der Stadt erzeugen (z. B. HoloPlanning, Strassenraum 3D, Züri wie neu, Zürich 4D, historisches Zürich). Bei der Umsetzung des digitalen Zwillings steht die Einbindung der Bürgerinnen und Bürger im Vordergrund. So werden Top-down lediglich Empfehlungen ausgesprochen, während die Umsetzung der Projekte in den einzelnen Fachämtern entschieden wird. In Zürich wird gezielt auf die Eigeninitiative der Menschen und Fachämter gesetzt (Bottom-up-Prinzip), sich an dem digitalen Zwilling zu beteiligen. Dabei wird zum einen auf

Mit ihrem digitalen Zwilling erzeugt die Stadt Zürich unter anderem Abbilder der historischen Bausubstanz der Stadt |
Quelle: Raymond Inauen – stock.adobe.com



die erhöhte Sichtbarkeit von Projekten durch den digitalen Zwilling gesetzt, zum anderen auf finanzielle Anreize. Letztere werden beispielsweise durch Innovationsförderungen wie den Innovationskredit, das Innovationsstipendium und die City Box realisiert, um Kreativität, Ideenentwicklung, Akzeptanz und Verständnis zu steigern. Ferner ist die strategische Vorgehensweise der Stadt darauf ausgerichtet die Zusammenarbeit zwischen den Fachämtern, der Privatwirtschaft, der Forschung und der Stadtgesellschaft zu erhöhen. Dabei geht es in der Kooperation darum, die Rollenverteilung beizubehalten und lediglich die Prozesse in den digitalen Zwilling zu verlagern.

In den MPSC beschäftigen sich laut den ausgewerteten Projektanträgen 22 der insgesamt 73 Modellprojekte mit dem Thema digitaler Zwilling. In Staffel 1 gaben 15,4 % der Kommunen an, den digitalen Zwilling umsetzen zu wollen, in Staffel 2 waren es 34,4 % und in Staffel 3 wiederum 32,1 %. Eine erweiterte Abfrage im Juli 2022 ergab jedoch, dass inzwischen 29 MPSC den Aufbau eines digitalen Zwillings als Ziel formuliert haben. Damit liegt der Anteil der Kommunen, die an der Umsetzung des digitalen Zwillings arbeiten, bei 38,5 %, 43,8 % und 39,3 % je Staffel (siehe Abbildung 5). Dabei handelt es sich sowohl um Modellprojekte in kleineren beziehungsweise ländlichen Kommunen wie Haßfurt, dem Landkreis Wunsiedel sowie der Kooperation aus Apfeldorf, Unterdießen und Fuchstal (AUF), als auch in Großstädten wie dem Verbundprojekt aus Hamburg, Leipzig und München im Projekt Connected Urban Twins (CUT), Mönchengladbach sowie Köln. Wie die Modellprojekte AUF und CUT bereits zeigen, gehen viele

Kommunen den digitalen Zwilling in interkommunaler Zusammenarbeit an. Oft handelt es sich um Entwicklungsgemeinschaften beziehungsweise Kooperationsprojekte, die dabei helfen sollen, gemeinsam neue Technologien in Städten und Gemeinden zu integrieren. Der Startpunkt der Kommunen bei der Entwicklung eines digitalen Zwillings variiert aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbedingungen. Die meisten Kommunen nennen eines der beiden folgenden Ziele:

- Erzeugung eines 3D-Stadtmodells
- Fokussierung auf spezifische Anwendungsfälle

Aus den durchgeführten Interviews mit den Verantwortlichen der ausgewählten Modellprojekte (siehe Kapitel 2), konnten folgende wesentliche Entwicklungsschritte und Meilensteine herausgearbeitet werden:

- **Hamburg** legte bereits 2005 mit dem Aufbau der Geodateninfrastruktur (GDI) den Grundstein für den digitalen Zwilling. Mit dem Hamburgischen Transparenzgesetz (HmbTG) von 2012 und zuletzt 2019 angepasst, der Gründung des Data Hubs (2017) und dem Projektantrag zur Förderung als MPSC wurde die erste Vernetzung von Systemen und Anwendungsfällen vorgenommen. Im Rahmen des Projekts CUT besteht das aktuelle Ziel darin, die Piloten funktionsfähig zu machen und diese zu evaluieren. Dabei ist CUT anwendungsfallorientiert und setzt daher auf den experimentellen Aufbau mehrerer digitaler Zwillinge in der Stadt. Es wurden die folgenden Umsetzungsschritte vorgeschlagen:

Das Projektteam von Connected Urban Twins (CUT) hat das in Hamburg entwickelte digitale Partizipationssystem DIPAS in die Partnerstädte (hier: München) transferiert | Quelle: Landeshauptstadt München



1. Schaffung eines Geobasiszwillings mit grundlegenden Informationen und Analysen, der den geodätischen Rahmen, also die verbindliche Grundlage für den Raumbezug aller Zwillinginstanzen bildet;

2. Aufbau von digitalen Zwillingen für identifizierte Anwendungsfälle mit Fokus auf den Mehrwert, den der digitale Zwilling schafft.

- In **Mönchengladbach** wurde bereits vor der Smart-City-Förderung mit dem Aufbau eines 3D-Stadtmodells begonnen und damit der erste Grundstein für einen digitalen Zwilling gelegt. Mit der Smart-City-Förderung hat der digitale Zwilling einen zusätzlichen Treiber gefunden. Seit dem 30. Juni 2022 existiert ein Prototyp des digitalen Zwillings für ein kleines Projektgebiet. Für dieses Gebiet wurden digitale Zwillinge mit unterschiedlichen Ausbaustufen entwickelt. Dazu wurden Daten, die der Kommune bereits vorliegen, mit neu erhobenen Daten kombiniert. Auf Basis dieses Prototyps sollen anschließend die Anforderungen an den digitalen Zwilling für die Stadt definiert werden. Im Folgenden sind die Umsetzungsschritte mit den jeweiligen Meilensteinen aufgezeigt:

1. Aufbau eines Prototyps: Datenkatalog, Dateninventar, Datenaufbereitung und Visualisierung in verschiedenen Ausbaustufen

2. Umsetzung des digitalen Zwillings: a) Interne Präsentation des Prototyps und Identifikation der Anwendungsfälle, b) Umsetzung der Anwendungsfälle im digitalen Zwilling

- **Freiburg** hat bereits 2009 mit dem Aufbau der städtischen Geodateninfrastruktur und dem Geodatenmanagement begonnen, die bereits Teil des digitalen Zwillings der Stadt sind. Dabei hat Freiburg, wie auch **Kirchheim**, bei der Entwicklung des digitalen Zwillings mit externen Akteuren zusammengearbeitet.

- Andere Kommunen wie **Haßfurt** befanden sich zum Zeitpunkt der Befragung/Erhebung in der Strategieentwicklung oder planten erste Umsetzungen (vgl. BBSR 2023). Dementsprechend haben viele Kommunen bereits den Austausch mit Forschungseinrichtungen oder anderen Kommunen aufgenommen, ein Vorgehen skizziert und Anwendungsfälle identifiziert, für die sie einen digitalen Zwilling umsetzen wollen. Für diese Anwendungsfälle wurden bereits Akteurinnen und Akteure identifiziert und erwartete Mehrwerte formuliert. Auf diese Weise bauen die Kommunen Wissen auf und erkunden strategische Vorgehensweisen, um die Bürgerschaft einzubinden und die Zusammenarbeit mit den Fachabteilungen zu fördern.

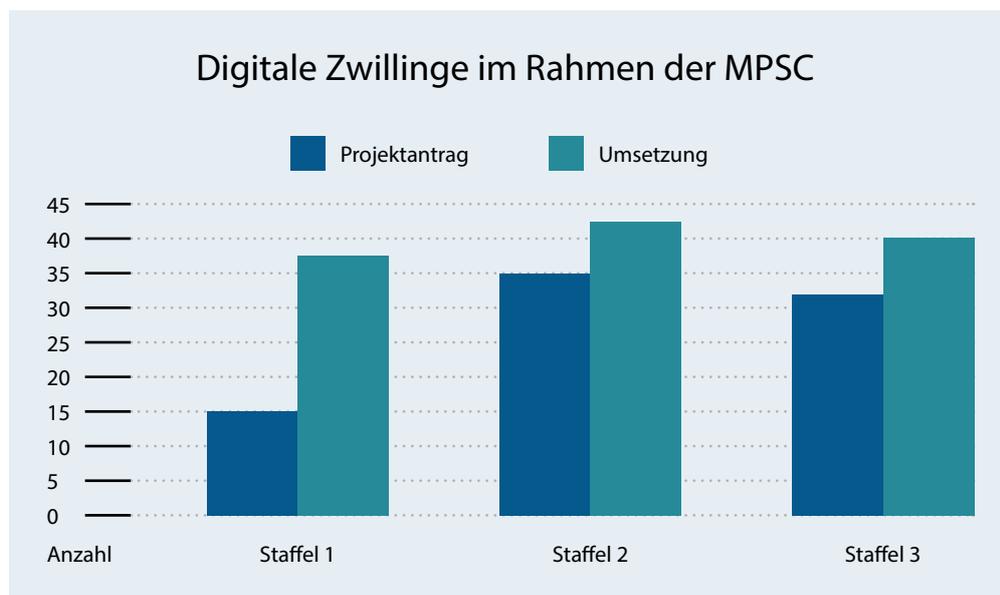


Abbildung 5: Umsetzung eines digitalen Zwillings nach Staffeln der MPSC | Quelle: eigene Darstellung

Wie aus den Strategien der MPSC hervorgeht, sind die Ziele sehr vielfältig, die mit dem Einsatz eines digitalen Zwillings in einer Stadt erreicht werden sollen. Viele Kommunen beabsichtigen die Nutzung des digitalen Zwillings für die **Bürgerbeteiligung**, für die **Stadtentwicklung**, für ein verbessertes Mobilitätssystem und für den

Aufbau einer **Datenplattform und -infrastruktur**. Ergänzend ist auch die grundsätzliche Möglichkeit des Monitorings und der Simulation ein Grund für die Einführung eines digitalen Zwillings. Abbildung 6 zeigt, in welchen Bereichen der digitale Zwillings künftig eingesetzt werden soll.



Abbildung 6: Anwendungsfälle, in denen der digitale Zwillings geplant (Projektantrag) beziehungsweise umgesetzt wird (Umsetzung). Datengrundlage sind die Angaben in Prozent von insgesamt 29 MPSC, die den digitalen Zwillings nannten | Quelle: eigene Darstellung

Anwendungsbereich	Kommunen
Stadtentwicklung/-planung	Haßfurt, Hamburg, Hof, Freiburg, Kirchheim, Bamberg, Geestland, Kempten, Münster, Pforzheim, Wuppertal, Kassel, Kaiserslautern, Wolfsburg, Paderborn, Dortmund-Schwerte, München, Leipzig, Hannover
Verkehr/Mobilität	München, Hof, Freiburg, Konstanz, Kempten, Pforzheim, Wuppertal, Solingen, Wolfsburg, Leipzig, Regensburg, Konstanz
Energie/Wärme	Leipzig, Kempten, Regensburg
Bürgerpartizipation/Kultur/Tourismus	Paderborn, Hamburg, Köln, Bamberg, Mühldorf, Einbeck, Kirchheim, Mönchengladbach, Leipzig, Kempten
Datenverarbeitung/3D-Abbild	Dortmund-Schwerte, Köln, Lübeck, Kempten, Wolfsburg, Lemgo, Braunschweig, Bochum, Kassel, Hannover, Regensburg, Geestland
Klima/Nachhaltigkeit	Konstanz, Pforzheim, München, Hof, Kaiserslautern, Wunsiedel, München, Leipzig, Hannover, Münster, Konstanz

Tabelle 2: Kommunen zugeordnet zu den Anwendungsfällen/-bereichen | Quelle: eigene Darstellung

Aus Sicht der Kommunen ist einer der wichtigsten Aspekte in der Bürgerbeteiligung die Visualisierung in 2D oder 3D. Dabei können die Bürgerinnen und Bürger die Stadt nicht nur digital betrachten und bildlich gesprochen „überfliegen“ (z. B. mit einer VR-Brille), sondern auch direkt Feedback an die Stadtverwaltung geben. Dies trägt unmittelbar dazu bei, dass sich Bürgerinnen und Bürger informieren und in Entscheidungsprozesse besser eingebunden werden können.

Im Bereich der Stadtentwicklung und -planung werden durch die Befragten die Potenziale der Visualisierung insbesondere in der Vereinfachung von Arbeitsprozessen und zur Optimierung der Arbeit durch datenbasierte Entscheidungen gesehen. Dadurch soll ein effizienteres und schnelleres Verwaltungshandeln ermöglicht und das interne Datenmanagement verbessert werden. Durch die Zusammenführung von Informationen und das Aufbrechen von Datensilos werden die Voraussetzungen geschaffen, um die Potenziale der Digitalisierung für die kommunale Planung freizusetzen. Auf Basis der vorhandenen und zu erhebenden Daten können dann Analysen und Simulationen zu verschiedenen Themen durchgeführt werden. Dazu gehören zum Beispiel Analysen von Potenzialflächen für Windkraft- oder Photovoltaikanlagen ebenso wie Maßnahmen zum Hochwasserschutz.

Weitere Anwendungsbeispiele aus den MPSC-Projektanträgen:

- Der **Landkreis Hof** beabsichtigt, den digitalen Zwilling für ein effizienteres und vorausschauendes Wassermanagement nutzen. Ziel ist es, einer potenziellen Wasserknappeit frühzeitig vorzubeugen.

- **Regensburg** plant eine dynamische Simulation von Energieflüssen, um durch intelligentes Monitoring von Stadtteilen eine wirtschaftliche Energieversorgung zu erzielen.
- **Wuppertal** plant, den digitalen Zwilling für die Modellierungen und Visualisierungen der Stadt, die Planung sowie für das Krisenmanagement zu nutzen.
- **Pforzheim** möchte durch Simulationen und Prognosen in der Lage sein, Ressourcen bedarfsgerecht einzusetzen.
- **Lübeck** und **Bamberg** planen jeweils den Einsatz eines digitalen Zwillings für ihre Kulturerbestätten, um diese einerseits Interessierten zu präsentieren und andererseits den Erhalt zu unterstützen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass einige MPSC bereits ein 3D-Abbild der Stadt erschaffen beziehungsweise erste Prototypen und Piloten gestartet haben. Die grundsätzliche Vielfalt der angedachten Anwendungsfälle ist jedoch enorm, was auch das hohe Potential der digitalen Zwillinge verdeutlicht.

Jenseits der geförderten Modellprojekte wurde in **Herrenberg** ein digitaler Zwilling in Zusammenarbeit mit dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HRLS) sowie Wirtschaftsunternehmen entwickelt. Besonders modellhaft an diesem Beispiel ist, dass es sich um einen der ersten Anwendungsfälle in Deutschland überhaupt handelt, der bis zu einem lauffähigen System umgesetzt wurde und damit den digitalen Zwilling in den Echtbetrieb überführt hat. Dieser wurde bereits im Januar 2019 der Bürgerschaft vorgestellt. Im Projekt

In Bamberg bildet ein digitaler Zwilling die Welterbestadt virtuell nach | Stadtplanungsamt, Stadt Bamberg



wurde auf eine langfristige (skalierbare und reproduzierbare) Etablierung des digitalen Zwilling und auf Wissensaufbau durch starke Kooperation gesetzt. Bei dem Vorgehen wurden zunächst die Grundlagen (Etablierung Projekt- sowie Entwicklungsteam, Erfassung Stand der Technik, Datengrundlage und Datenverfügbarkeit) erarbeitet. Anschließend wurde ein Basismodell mit weiterer Datenerhebung und -integration erstellt. Sobald genügend Daten vorlagen, wurde mit den ersten 3D-Visualisierungen und Simulationen begonnen.

Die drei im Interview beschriebenen Anwendungsfälle, die in Herrenberg umgesetzt wurden, sind aus der Zusammenarbeit zwischen Forschung und Kommune entstanden (vgl. Dembski et al. 2020). Bereits während des laufenden Projekts wurden fertige Komponenten direkt auf den Markt gebracht, um sie zu testen und Feedback von Bürgerinnen und Bürgern zu erhalten. Dieses floss dann in den Entwicklungsprozess ein, um die Komponenten zu verbessern.

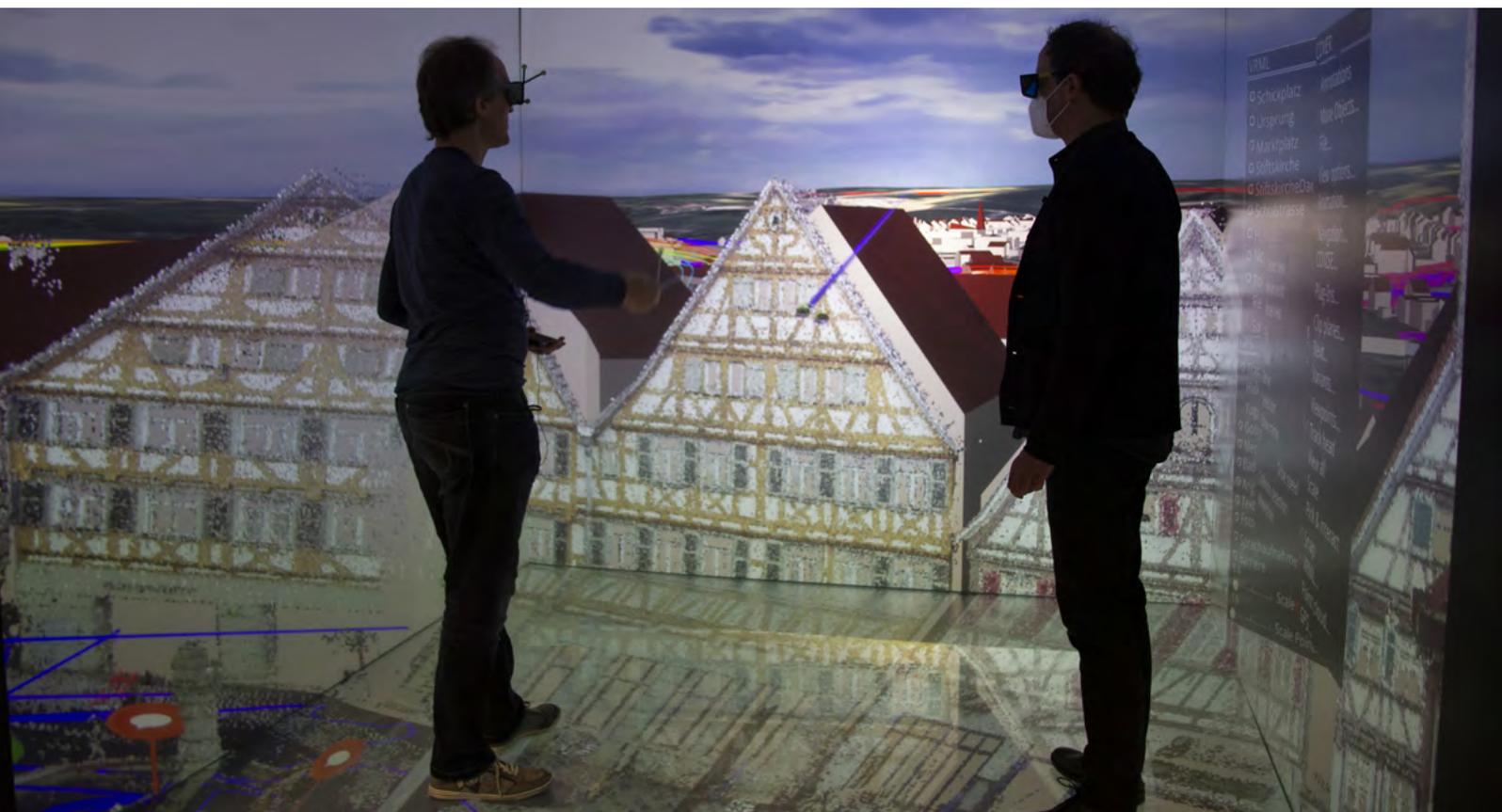
1. Verkehr, Verkehrsentwicklungsplan und Verkehrsentlastung: Für Verkehrssimulationen und räumlich-strategische Netzwerkanalysen kommen Kameradaten (Echtzeitdaten), eine Tracking App (freiwillige Nutzung – Aufzeichnung täglicher Routen) und eine KI zum Einsatz. Dazu werden potenzielle Bewegungsmuster von Autos

und zu Fuß gehenden Personen berechnet. Ziel war es, das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden besser zu verstehen und perspektivisch die Planungsprozesse daran auszurichten.

2. Real Labor Stadtquartiere 4.0: In diesem Projekt wurden aktuelle Themen der Öffentlichkeit aufgegriffen und die Qualität und Sicherheit im öffentlichen Raum wurde untersucht. Das Ergebnis war eine App vorwiegend für Jugendliche, die mit einem Bild verbundene Gefühle an einem Ort georeferenziert im digitalen Zwilling abbildet, visualisiert und analysiert. Das Thema stand unter dem Begriff „Urban Emotions“ und wurde von den projektverantwortlichen Personen als wichtiger Aspekt der Bürgerbeteiligung gesehen. Ziel war es sogenannte Angsträume zu identifizieren und im Anschluss durch städtebauliche Maßnahmen zu reduzieren.

3. Feinstaubsensorik: In diesem Anwendungsfall geht es um eine zuverlässigere Vorhersage von Wetterereignissen im Stadtgebiet. Zu diesem Zweck wurden Windströmungssimulationen sowie allgemeine Wettersimulationen auf Basis der installierten Sensoren durchgeführt. Dazu wurden Windströme, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Luftbelastung berechnet, um schließlich die räumliche Verteilung verschiedener Wetterereignisse zu analysieren.

Die Stadt Herrenberg hat ihren digitalen Zwilling gemeinsam mit dem Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart erstellt |
Quelle: Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart



In **Kirchheim** ist ein digitaler Zwilling in Planung, der perspektivisch die Prüfung von Baugenehmigungen und die Durchführung von Bauleitplanverfahren unterstützen soll. Für die Umsetzung wurden folgende fünf Meilensteine identifiziert:

1. Integration und Erweiterung der Datenbasis

Die Planung zur Umsetzung des digitalen Zwillings besteht zunächst in der Zusammenführung der Daten, die zur Visualisierung der Stadt als 3D-Modell benötigt werden. Dazu zählt die Sammlung von Grundlagendaten und die zusätzliche Datenerhebung (als georeferenzierte Daten) sowie deren Einspeisung in ein Datenmanagement-Tool.

2. Simulationen auf der Datenbasis ermöglichen

Das Datenmanagement-Tool des digitalen Zwillings bildet die Voraussetzung für die Erfassung und die Visualisierung der Daten. Die Visualisierung erfolgt als 3D-Stadtmodell mit einem Level of Detail 2 (LoD2). Die Daten werden als verschiedene Datensphären beziehungsweise Datenschichten integriert.

3. Abgleich zwischen Bauantrag und Baurecht

Im nächsten Schritt werden vom digitalen Zwilling alle für die Prüfung einer Baugenehmigung relevanten Daten aufbereitet. Da Kirchheim als Gemeinde keine Baugenehmigungen erteilt, sondern lediglich ein gemeindliches Einvernehmen erteilt, wird folgender Ablauf angestrebt:

- Ein eingereichter (digitaler) Bauantrag wird in den digitalen Zwilling eingespeist

- Das Gebäude wird vom digitalen Zwilling simuliert
- Im digitalen Zwilling wird virtuell geprüft, ob das Vorhaben Abweichungen zwischen der geplanten Nutzung und den Festsetzungen des Bebauungsplans aufweist.

Hält sich die geplante Realisierung des Vorhabens nicht im baurechtlich vorgegebenen Rahmen, bescheinigt der digitale Zwilling eine Abweichung vom Baurecht. Zusätzlich soll der digitale Zwilling in der Lage sein, die geplante Realisierung auch im Verhältnis zur bebauten Umgebung zu überprüfen.

4. Umsetzung des Sonderfalls nicht beplanter Innenbereich (§ 34 Abs. 2 BauGB)

Liegt die geplante Nutzung nicht im Geltungsbereich eines Bebauungsplans, aber innerhalb eines im Zusammenhang bebauten Ortsteils (nicht beplanter Innenbereich), kommt § 34 BauGB zur Anwendung. In diesem Fall bemisst sich die Zulässigkeit eines Vorhabens nicht durch einen bereits digital integrierten Bebauungsplan, sondern insbesondere danach, ob sich das Vorhaben in die Eigenart der näheren Umgebung einfügt. Der digitale Zwilling soll in diesem Zusammenhang das Ausmaß der Abweichung zwischen der tatsächlich vorhandenen Umgebungsbebauung und der geplanten Nutzung analysieren und Sachbearbeitenden eine Bewertungsgrundlage für die Prüfung des Einfügegebots (§ 34 Abs. 2 BauGB) liefern. Grundlage hierfür ist die Erstellung einer „baurechtlichen Prüfebene“ für den digitalen Zwilling.



5. Integration der Bauleitplanung

In einer fünften Ausbaustufe wird schließlich die Durchführung des gesamten Bauleitplanverfahrens im Kontext des digitalen Zwillings in den Blick genommen. Dabei werden die Art und das Maß der baulichen Nutzung wie auch eine Verkehrsleitung sowie die Anzahl der erforderlichen Stellplätze abgebildet. Die Durchführung des Bauleitverfahrens im digitalen Zwilling soll dazu führen, dass formelle wie auch informelle Planungen im Zwilling auf-

einander abgestimmt werden können. Indem alle Planungsbeteiligten ihre notwendigen Informationen im Zwilling hinterlegen, kann die Erstellung eines Bebauungsplans optimiert werden, da unnötige Korrekturen und zeitaufwändige Abstimmungsprozesse vermieden werden. So ermöglicht der digitale Zwilling Simulationen, die die Pläne zueinander in Beziehung setzen und so mögliche Widersprüche und Anpassungsbedarfe aufzeigen.

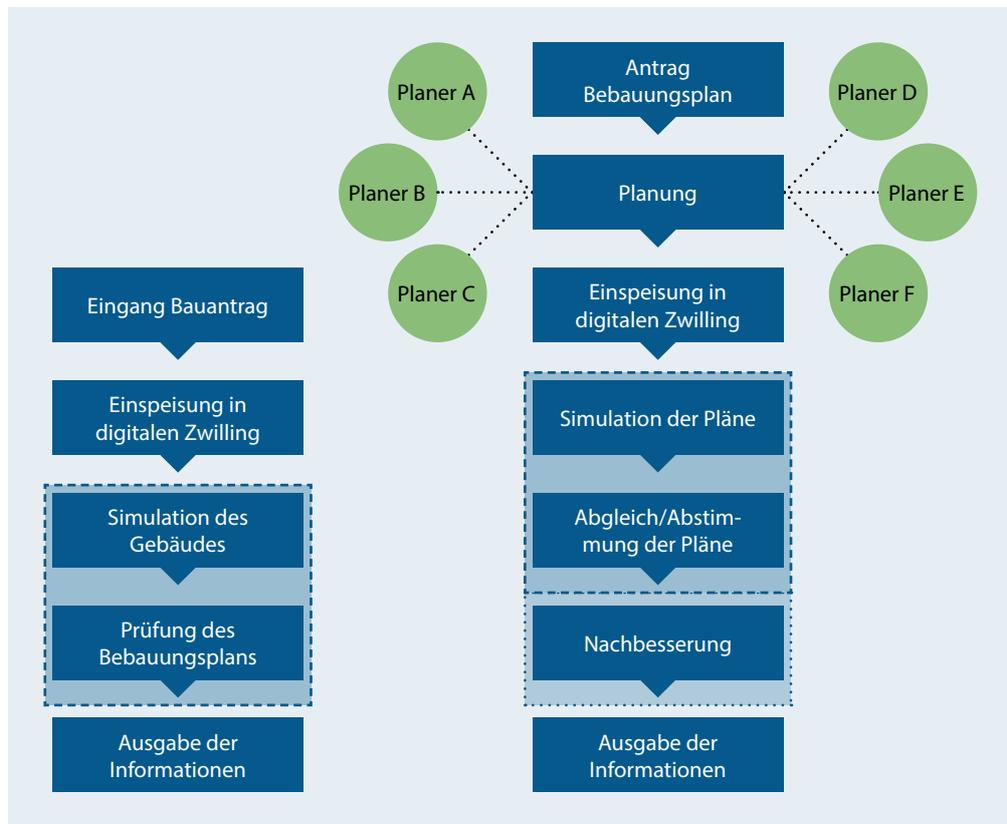


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Prüfung einer Baugenehmigung (links) und des Verfahrens zur Aufstellung eines Bebauungsplans (rechts) mit der Unterstützung eines digitalen Zwillings am Beispiel Kirchheims | Quelle: eigene Darstellung

3.3 Herausforderungen bei der Umsetzung

Integration in die kommunalen Verwaltungsstrukturen: Die Implementierung von Daten, Aufgaben und Prozessen in den digitalen Zwilling aus

den verschiedenen Fachämtern ist umfangreich und bedarf gekläarter Zuständigkeiten. Die Komplexität eines digitalen Zwillings, die nötige Kommunikation, das Verständnis, die Prozessplanung und Umsetzung sowie die benötigten finanziellen Mittel eines anwendungsfallspezifischen digitalen

Zwillings erfordern ein effektives Projektmanagement in der Verwaltung. Dieses kann auch mit einer potentiellen Anpassung von Organisationsstrukturen einhergehen. Dazu gehören definierte Verantwortlichkeiten für spezifische Aufgaben, wie die Kommunikation mit Stakeholdern oder die Integration von Daten verschiedener Fachbereiche. Ein gemeinsames Begriffsverständnis des digitalen Zwillings ist in der Verwaltung über Organisationsbereiche hinweg zu entwickeln, so dass die Kommunikation von Aufgaben, die Integration von Fachverfahren und die Einbeziehung der Bürgerschaft erfolgen kann. Aufkommende **Missverständnisse und Unklarheiten** zum digitalen Zwilling sollten frühzeitig ausgeräumt werden. Um diese Herausforderung zu meistern, ist eine durchgängige intensive **Kommunikation** innerhalb der Verwaltung notwendig.

Kommunikation und Zusammenarbeit: Die Größe einer Kommune ist ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Planung und Umsetzung eines digitalen Zwillings, der sich in verschiedenen Bereichen zeigt. Grundsätzlich interagieren im Rahmen der Umsetzung eines digitalen Zwillings verschiedene Stakeholder aus unterschiedlichen Bereichen der Stadt. Zusätzlich müssen im digitalen Zwilling die notwendigen Daten erhoben, Schnittstellen eingerichtet und technische Voraussetzungen berücksichtigt werden. Diese Anforderungen erhöhen die Komplexität der Umsetzung. Dabei kann es für größere Kommunen eine Herausforderung sein, die notwendigen Stakeholder und Datenquellen zu identifizieren und für den digitalen Zwilling nutzbar zu machen. Während kleinere Kommunen die Kommunikation zwischen den Stakeholdern als weniger schwierig einschätzen, stellt der Mangel an digitaler Infrastruktur, technischem Know-how und verfügbarem Personal eine Herausforderung dar.

Schaffung der technischen Voraussetzungen: Die Schaffung einer **fachbereichsübergreifenden Datenbasis** ist von zentraler Bedeutung. Auch wenn viele Daten bereits vorhanden sind (in den Städten oder für die Städte), ist oft unklar, wo diese Daten hinterlegt sind und wer dafür verantwortlich zeichnet. Während Basisinformationen zum Beispiel bei

den Vermessungs- und Statistikämtern der Länder bezogen werden können, müssen Daten an anderen Stellen häufig eigens erhoben werden.

Die erforderliche Datenmenge sowie die Darstellungstiefe (Level of Detail, LoD) stellen oft eine Herausforderung dar, da Erfahrungen über die jeweilige Datenqualität fehlen. Neben der Qualität sind auch Aspekte des Datenschutzes und der Datensicherheit zu berücksichtigen. Es ist festzulegen, welche Daten erhoben und verwendet werden dürfen beziehungsweise wie mit personenbezogenen Daten umzugehen ist. Liegen sensible Daten vor, so muss deren Sicherheit garantiert werden. Es empfiehlt sich, die Erstellung eines rechtlich normierten Rahmens, in dem klar definierte Verträge über die Datennutzung (Nutzungsrechte) und Datenverarbeitung (Nachnutzungsrechte) definiert sind.

Technische Herausforderungen: Eine Herausforderung besteht bereits darin, ein klares Bild davon zu bekommen, welche **technischen Lösungen** in den Städten schon **vorhanden** sind und was sie bereits leisten. Der Einsatz neuer Technologien, die mit dem digitalen Zwilling einhergehen, erschwert zusätzlich die Durchführung von Ausschreibungsprozessen. Entsprechende Kompetenzen für die Formulierung von fachlichen und technischen Anforderungen sollten darum aufgebaut werden. Dies kann sowohl durch internen als auch externen Austausch im Sinne eines Wissenstransfers erreicht werden.

Für die **Ausschreibung** eines digitalen Zwillings müssen bereits im Vorfeld Merkmale, Ausstattung sowie technische Anforderungen abgefragt beziehungsweise geklärt werden. So sollte der digitale Zwilling möglichst klar definiert werden, um auch das Produkt zu bekommen, für den eine Kommune einen Bedarf identifiziert hat. Darüber hinaus müssen technische Lösungen nicht nur verstanden, sondern dann auch langfristig etabliert werden. Dazu gehört auch die Schaffung von **Standards und Schnittstellen (Interoperabilität)**, um einen reibungslosen Datenaustausch und eine Datenintegration zu ermöglichen. Ein Beispiel dafür ist die Schaffung einer Geodateninfrastruktur (GDI).

4 Konzeptionelles Modell für den Aufbau eines kommunalen digitalen Zwillings

Im Folgenden wird vor dem Hintergrund der geschilderten Herausforderungen ein konzeptionelles Modell für die Umsetzung eines digitalen Zwillings vorgestellt. Dabei werden die Ausgangssituation, die Grundlagen, die notwendigen Komponenten und Bausteine sowie die prozessuale Betrachtung dargestellt.

4.1 Ausgangssituation

Der Aufbau eines digitalen Zwillings erfordert Organisation, Kommunikation und Verständnis – sowohl verwaltungsmäßig als auch mit externen Akteuren und mit der Öffentlichkeit (siehe Abbildung 8).

Die Schaffung eines einheitlichen Verständnisses über den digitalen Zwilling ist Voraussetzung für eine gute Kommunikation im Projekt und die Grundlage für eine übergreifende Zusammenarbeit zwischen den Stakeholdern. Damit einher geht auch die Akzeptanz der Projektbeteiligten, die über ein gemeinsames Verständnis und eine klare Zielsetzung des Projekts besser eingebunden werden können. Realistische und umsetzbare Ziele in einem definierten Zeitraum, deren Erfolg durch erzielte Mehrwerte erfasst werden kann, erhöhen zudem die Transparenz, beziehungsweise Akzeptanz und Erfüllung des Projektziels. Damit werden Change-Management und die Etablierung des digitalen Zwillings ermöglicht.



Abbildung 8: Ausgangslage zur Umsetzung des digitalen Zwillings | Quelle: eigene Darstellung

4.2 Grundlagen

Die Studie hat bereits grundlegende Aspekte aufgezeigt, die für die Umsetzung des digitalen Zwillings in Städten die Basis bilden. Die wichtigsten werden im Folgenden aufgegriffen.

Ressourcen

Der digitale Zwilling braucht verschiedene Ressourcen, die vor und mit Beginn des Projekts berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen finanzielle Mittel, die sowohl zur Schaffung einer technischen Infrastruktur und entsprechender Datengrundlagen, als auch für entsprechendes datenkompetentes Personal eingesetzt werden.

Verantwortlichkeiten

Mit den Personalressourcen gehen auch Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten einher, die

für die Zuordnung zu Prozessen für eine effektive Arbeitsteilung bei der Umsetzung des digitalen Zwillings nötig sind. Tendenziell bedarf solch ein Projekt einer eigenständigen Projektleitung. Dies zeigen insbesondere auch die europäischen Beispiele, die durch ihre klare Verantwortungsstruktur eine bessere und intensivere Kommunikation und damit ein besseres Verständnis und mehr Transparenz erreichen können. Die Verantwortlichkeiten sollten dabei nicht nur auf der Leitungsebene liegen, sondern auch auf die Ämter und deren Mitarbeitende übertragen werden.

Wissensaufbau

Der Aufbau und Erhalt von Wissen in den Kommunen sind ebenfalls notwendig, um einen digitalen Zwilling zu entwickeln. Neben einer Personalstelle mit hoher Datenkompetenz und spezifischer technischer Kompetenz für digitale Zwillinge



Abbildung 9: Der digitale Zwilling erfordert eine Dateninfrastruktur, die die Erfassung, Speicherung und Weiterverarbeitung von Daten ermöglicht | Quelle: kunakorn – stock.adobe.com

sollte auch auf eine breite Weiterbildung der Mitarbeitenden im Bereich Digitalisierung geachtet werden. Häufig geht dieser Kompetenzaufbau auch mit einem Kultur- und Führungswandel einher. Nicht zuletzt ist auch die Einbindung externer Kompetenzen möglich – hier sollte die kommunale Verwaltung darauf achten, dass immer auch ein Wissenstransfer zu den Mitarbeitenden in der Verwaltung ermöglicht wird.

Standards

Standards für Prozesse, Schnittstellen und maschinenlesbare Daten erleichtern die Integration in den digitalen Zwilling und fördern die Interoperabilität. Als Beispiel sei hier XPlanung (Krause et al. 2020) genannt: XPlanung³ ist ein Datenstandard und Datenaustauschformat für Planungsdaten, das einen verlustfreien Transfer ermöglicht. Dazu gehören auch XPlanGML für die einheitliche Darstellung und XBau⁴ für die Interaktion zwischen Beteiligten. Insgesamt tragen diese Standards zum Aufbau einer kommunalen Geodateninfrastruktur (GDI)⁵ bei. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Ergebnisse des seit 2022 laufenden technischen Normungsverfahrens (DIN SPEC 91607) „Digitaler Zwilling für Städte und Kommunen“ eine Standardisierung vorantreiben werden. Abschluss und Veröffentlichung sind für Anfang 2024 geplant.

Daten

In vielen Kommunen wird bereits von einem digitalen Zwilling gesprochen, wenn grundlegende Daten (Geobasisdaten) enthalten sind und diese

visualisiert werden. Der erste Schritt ist dabei die Durchführung einer Dateninventur. Darin wird zunächst systematisch der aktuelle Stand der Datenverfügbarkeit bezogen auf Anwendungsfälle und Fachbereiche erhoben. In diesem Zusammenhang sollte auch geklärt werden, welche Inhalte in welcher Darstellungstiefe potenziell im digitalen Zwilling dargestellt beziehungsweise weiterverarbeitet werden können.

Infrastruktur

Der digitale Zwilling erfordert eine Dateninfrastruktur, die die Erfassung, Speicherung und Weiterverarbeitung von Daten ermöglicht. Konkret geht dies häufig mit der Erstellung eines Datenkatalogs und der Nutzung einer Datendrehscheibe (z. B. urbanen Datenplattform) einher. Bausteine und Komponenten der Infrastruktur werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

Evaluierung

Die meisten der im Rahmen dieser Studie interviewten Personen haben aktuell noch keine Evaluierungsstrategie oder nutzen diese nur intern. Zukünftig sollen Bürgerbeteiligungen genutzt werden, um Feedback für den digitalen Zwilling zu erhalten, aber auch, um zusätzliche Anforderungen zu identifizieren. Grundsätzlich sollten schon frühzeitig Evaluierungskonzepte vorliegen, aus denen erwünschte Wirkungen eines digitalen Zwillings (z. B. verbesserte Planung oder Beteiligung, Systematisierung von Datengrundlagen o. ä.) hervorgehen.

³ <https://xleitstelle.de/xplanung>

⁴ <https://xleitstelle.de/xbau>

⁵ https://www.geodaten.niedersachsen.de/startseite/kommunale_gdi/xplanung_xbau/xplanung-und-xplangml-in-der-bauleitplanung-117461.html

4.3 Bausteine und Komponenten

Ein digitaler Zwilling benötigt verschiedene Komponenten: physische Assets im Sinne von Objekten, Subjekten und Prozessen, die im digitalen Zwilling enthalten sein können, virtuelle Modelle, Daten, Verbindungen (real und virtuell) und Dienste (Anwendungsfälle). Im Folgenden werden die wesentlichen Bausteine beziehungsweise Komponenten von digitalen Zwillingen aufgezeigt. Als Ausgangspunkt für die Konzeption dient Abbildung 10, die die prinzipielle Grobarchitektur eines digitalen Zwillings zeigt. Sie setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Basis des digitalen Zwillings ist die **Infrastruktur**. Grundlegend dabei ist häufig die Geodateninfrastruktur (GDI), wobei hier beispielhaft Drohnen und Sensorik für die Datenerfassung aufgezeigt werden.
- Das **Fundament** bilden die **Daten** der Stadt, die bereits vorhanden sind oder erfasst werden. Sie können in eine Datenplattform integriert sein, aber auch in einzelnen Fachämtern hinterlegt sein. Essenziell sind dabei definierte Schnittstellen und Standards, die einen problemlosen Datentransfer ermöglichen.
- Über die **Datendrehscheibe** (z. B. urbane Datenplattform), die über vorhandene Schnittstellen mit dem Fundament verbunden ist, werden die Daten in den digitalen Zwilling eingespeist.
- Im digitalen Zwilling selbst implementiert man **verschiedene Funktionen** die in der Regel aufeinander aufbauend realisiert werden:

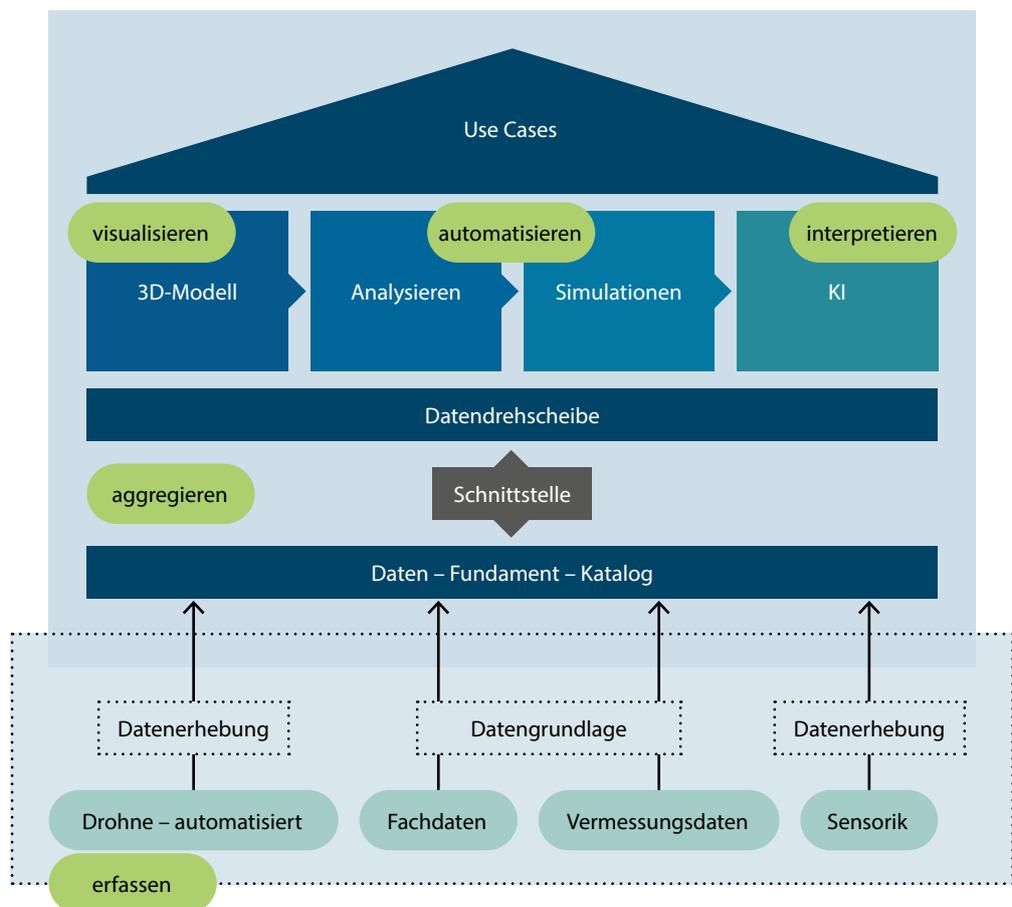


Abbildung 10: Grobarchitektur eines digitalen Zwillings in Kommunen | Quelle: eigene Darstellung

- Erstellung eines 3D-Abbilds
 - Analysen von zum Beispiel Prozessen, Räumen oder Infrastrukturen
 - Simulationen auf Basis von Algorithmen und Datenanalysen
 - Nutzung von KI zum Beispiel für das automatisierte Auffinden von Zusammenhängen in den Datensätzen oder auch zur Bewertung von Entscheidungsoptionen
- Die umfassende Nutzung von KI (z. B. im Sinne von maschinellem Lernen) wird aktuell als höchster Reifegrad im digitalen Zwilling verstanden.

Dabei sollte der digitale Zwilling immer für einen konkreten Anwendungsfall erstellt werden, der anhand folgender Leitfragen charakterisiert werden kann:

- Welche Daten werden benötigt?
- Was muss abgebildet werden?
- Welche Analysen werden benötigt?
- Was muss simuliert werden?
- Wird KI genutzt?

Der digitale Zwilling sollte als Integrationsplattform erstellt werden und im Laufe der Entwicklung weitere Module integrieren können. Dabei sollte auf Basis des Bedarfs entschieden werden, welche Daten und Komponenten im Sinne einer Entwicklungs-Roadmap umgesetzt werden.

4.4 Prozessuale Anforderungen

Bei der Betrachtung der Vorgehensweise zum Aufbau eines digitalen Zwillings wurden fünf Bereiche identifiziert, in denen Anforderungen zu spezifizieren sind: die technische Infrastruktur, der organisatorische und strategische Aufbau, die Akteure, die Data Governance und schließlich die Anwendungsfälle.

Aspekte, die im Rahmen der Anforderungen an die technische Infrastruktur berücksichtigt werden sollten: Die zugrundeliegende technische Infrastruktur stellt eine wesentliche Grundlage für die Umsetzung des digitalen Zwillings dar. Die im digitalen Zwilling stattfindende Vernetzung

unterschiedlicher Daten und Systeme (**Schaffung von Interoperabilität**) erfordert Standards und Datenschnittstellen, die einen Datenaustausch ermöglichen. Eine Klassifizierung der verschiedenen Datenarten (z. B. in offene Daten, geschlossene Daten, Sensordaten, sicherheitskritische Daten) ist von Vorteil. Ergänzend können umfassende Datenstrategien Regeln für die Zugänglichkeit von Daten und Anforderungen an den Datenaustausch enthalten. Die Daten selbst können dann über ein (Open-Data-) Portal, eine urbane Datenplattform, eine Datendrehscheibe oder eine alternative technische Lösung dem digitalen Zwilling zugänglich gemacht werden.

Aspekte, die im Rahmen der Anforderungen an die Organisation und Strategie (Aufbau) des Projektes digitaler Zwilling berücksichtigt werden sollten: Die Organisation des Gesamtprojektes umfasst mehrere wichtige Aspekte, wie zum Beispiel die Entwicklung einer Strategie zur Umsetzung eines digitalen Zwillings. Diese Strategie sollte neben den klassischen Elementen, wie Meilensteine, Ziele, erwarteter Mehrwert und Herausforderungen, insbesondere die Rolle des digitalen Zwillings in Stadtentwicklungsprozessen thematisieren. Ebenso empfiehlt es sich, Zuständigkeiten, Rollenverteilungen und Akteure zu definieren. Zudem sind Steuerung, Koordination und Kommunikation notwendig. Dabei ist die Durchführung von Beteiligungsformaten (Workshops o. ä.) zu empfehlen, die verschiedene Stakeholder einbeziehen. Die grundsätzliche Vorgehensweise kann dabei sowohl Top-down (bis in alle Ebenen zugleich, für den Aufbau der technischen Infrastruktur) sowie Bottom-up (zum Erzeugen von Verständnis und Mitwirkung) sein. Agilität sollte bei derart großen Projekten vorhanden sein, um dynamisch auf Veränderungen eingehen zu können sowie um sich anzupassen und zu lernen.

Aspekte, die im Rahmen der Anforderungen an die Akteure zur Umsetzung des digitalen Zwillings berücksichtigt werden sollten: Es gibt viele verschiedene Stakeholder, die an dem digitalen Zwilling beteiligt beziehungsweise davon betroffen sind. Zumindest diese Akteure sollten für einen gut funktionierenden digitalen Zwilling zusammenarbeiten. Es wird empfohlen, Kompetenzen und Wissen intern aufzubauen. Daher sollte das Team

zur Entwicklung des digitalen Zwillings möglichst aus Angehörigen von Fachbehörden, im Speziellen auch Planerinnen und Planer, und typischerweise IT-Dienstleistungsunternehmen bestehen. Das Hinzuziehen von externem Wissen und die Kooperation mit Externen wird ebenso empfohlen. Ein aktiver Austausch zwischen Kommunen, (angewandter) Wissenschaft, Unternehmen und weiteren Akteuren kann die Kompetenzen und das Verständnis verbessern und zu einer besseren Umsetzbarkeit des digitalen Zwillings führen.

Aspekte, die im Rahmen der Anforderungen an die Data Governance berücksichtigt werden sollten: Data Governance ist ein zentraler Bestandteil des digitalen Zwillings und von Smart Cities und wird in der ebenfalls im Rahmen der Begleitforschung der Modellprojekte Smart Cities entstandenen Studie zu „Datenstrategien in Kommunen“ (BBSR 2023) ausführlich thematisiert.

Die Handlungsschwerpunkte für die Kommunen sind **Datensouveränität, Datenkompetenz, Datenzuständigkeiten** und **Datenkooperationen**. Das Einbeziehen verschiedenster Datenquellen hat zur Folge, dass es einen erhöhten Bedarf an konsistenter **Datenqualität** und **Verknüpfungsmöglichkeiten** gibt. Die Verknüpfung der Daten, sowie die Frage, ob sie offen oder geschlossen zur Verfügung stehen, ist essenziell, damit sie im digitalen Zwilling verarbeitet werden können.

Aspekte, die im Rahmen der Anwendungsfälle im digitalen Zwilling berücksichtigt werden sollten: Es wurde bereits in den ersten Kapiteln über mögliche Anwendungsfälle gesprochen. Es wird empfohlen, den digitalen Zwilling auf Basis von konkreten Anwendungsfällen aufzubauen, da diese das Aufzeigen von Mehrwerten erleichtern und das Verständnis für die Umsetzung eines solch komplexen Projektes erleichtern.



Der digitale Zwilling sollte auf Basis von konkreten Anwendungsfällen aufgebaut werden. Diese erleichtern das Aufzeigen von Mehrwerten sowie das Verständnis für die Umsetzung eines solch komplexen Projektes.



Abbildung 11: Aus dem digitalen Zwilling der Stadt Kassel erzeugte Ansicht | Quelle: Stadt Kassel, Vermessung und Geoinformation



5 Leitfaden für den Aufbau eines digitalen Zwillings

Aufbauend auf das in Kapitel 4 vorgestellte konzeptionelle Modell wird im Folgenden ein idealtypischer Ablauf zur Schaffung der Voraussetzungen und zum Aufbau eines kommunalen digitalen Zwillings skizziert.

5.1 Voraussetzungen schaffen

Wie bei vielen Umsetzungsvorhaben ist es zunächst wichtig, die notwendigen Voraussetzungen zu schaffen. Abbildung 12 zeigt als Prozessmodell die typischen Schritte, die eine Kommune vor der Umsetzung durchlaufen sollte.

Im Folgenden wird jeder einzelne Schritt anhand von Leitfragen erläutert. Für die kommunale Praxis wurden diese Leitfragen in der Checkliste „Voraussetzungen schaffen“ (siehe Tabelle 3) aufbereitet.

Definition von Problem und Ziel:

Hier sollte die Basis geklärt und ein gemeinsames Bewusstsein für den digitalen Zwilling geschaffen werden.

Empfehlung: Einen Anwendungsfall klar und konkret definieren.

Leitfragen:

- Gibt es einen Bedarf/konkrete Probleme – einen Anwendungsfall?
- Wurde ein gemeinsames Verständnis des digitalen Zwillings aufgebaut?
- Ist der intendierte Anwendungsfall mit einem digitalen Zwilling umsetzbar?
- Braucht es den digitalen Zwilling oder gibt es andere Lösungen?
- Gibt es potenzielle weitere Anwendungsfälle, die den digitalen Zwilling brauchen?
- Gibt es Mehrwerte durch den Einsatz des digitalen Zwillings?
- Sind die Ziele für den Anwendungsfall im Sinne von messbaren Kriterien klar formuliert?

Zuweisen von Verantwortlichkeiten:

Aufbau des Projektmanagements für den digitalen Zwilling und den Aufbau von Strukturen.

Empfehlung: Klare Verantwortlichkeiten schaffen.

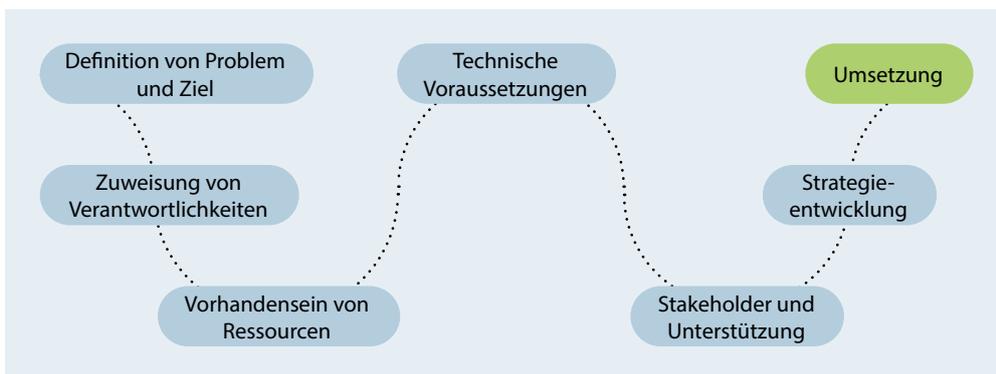


Abbildung 12: Idealtypischer Ablauf zur Schaffung von Voraussetzungen | Quelle: eigene Darstellung



Bereits vor Ort vorhandene Infrastrukturen und Technologien für den digitalen Zwilling sollten genutzt werden | Quelle: Blue Planet Studio – stock.adobe.com

Leitfragen:

- Gibt es eine Projektleitung (Verantwortung) für den digitalen Zwilling?
- Gibt es jemanden, der die Koordination und Steuerung übernimmt?
- Wurde der digitale Zwilling für das gemeinsame Verständnis im Projekt von der Projektleitung definiert?

Vorhandensein von Ressourcen:

Der digitale Zwilling ist ein langfristiges Projekt, das viele Ressourcen bindet, daher ist eine frühzeitige Klärung der vorhandenen Ressourcen essenziell.

Empfehlung: Die notwendigen personellen und finanziellen Ressourcen sicherstellen.

Leitfragen:

- Gibt es genügend Ressourcen, speziell finanzielle, für den digitalen Zwilling?
- Gibt es Personen, die sich mit dem digitalen Zwilling auskennen?
- Wurden relevante Fachämter/Personen/Fachpersonal einbezogen? (Kompetenzen)
- Ist eine Integration in den digitalen Zwilling gewollt? (Akzeptanz)
- Wurde die Projektunterstützung gut integriert?
- Wurden relevante Informationen aus den Fachbereichen kommuniziert?
- Funktioniert die Kommunikation zwischen den Beteiligten?

- Sind die Rahmenbedingungen für eine gute Transparenz intern geschaffen?

Technische Voraussetzungen:

Die technischen Voraussetzungen in der Kommune sollten rechtzeitig identifiziert werden, damit bereits vorhandene Infrastrukturen und Technologien für den digitalen Zwilling genutzt werden können. Darüber hinaus sollte identifiziert werden, was für die Umsetzung des Anwendungsfalls benötigt wird. Eine zielorientierte Dateninventur ist dabei eine effektive Maßnahme für die Umsetzung des Anwendungsfalls.

Empfehlungen:

- Durchführung einer Dateninventur
- Eignung der technischen/datenbezogenen Gegebenheiten für den digitalen Zwilling prüfen
- Mit vorhandenen Daten erste Visualisierungen der Stadt durchführen (bessere Transparenz/Akzeptanz/Verständnis).

Leitfragen:

- Wurde der aktuelle technische Stand der Stadt erfasst?
- Wurden Technologien erfasst, die bereits existieren und genutzt werden können? (vorhandene Ressourcen nutzen)
- Wurden noch benötigte Technologien (siehe Abbildung 12) identifiziert?

- Wurde geklärt, ob die vorhandenen Rechenressourcen ausreichen, um einen digitalen Zwilling zu betreiben?
- Wurde geklärt, ob Ressourcen vom Land/Bund (z. B. über Förderungen oder landesweite Geodatenportale wie in Bayern⁷) bereitgestellt werden können?
- Existiert eine technische Infrastruktur, in die der digitale Zwilling integriert werden kann?
- Gibt es Schnittstellen zwischen den zu integrierenden Datenlieferanten? Gibt es Standards?
- Wurden bereits vorhandene Daten identifiziert?
- Ist bekannt, wo diese Daten sind und wer darauf Zugriff hat?
- Ist bekannt, wo Daten gespeichert werden?
- Wurden weitere Datenquellen beziehungsweise Lieferanten/Systeme identifiziert?
- Ist bekannt, wie weitere nötige Daten erhoben werden?
- Wurde identifiziert, welche Daten flächendeckend benötigt werden?

Stakeholder und Unterstützung (extern):

Hier geht es darum, externes Fachwissen und Partner einzubeziehen, um den digitalen Zwilling angehen zu können. Dabei kann auch das Ergebnis sein, dass über die Bildung eines Netzwerks hinaus die Gründung einer Entwicklungsgemeinschaft sinnvoll ist.

Empfehlung: Genaue Formulierung der Anforderungen und Wünsche an Unterstützende.

Leitfragen:

- Haben wir Partner mit thematischer Tiefe und technischer Expertise?
- Haben wir Partner verschiedener Expertise (z. B. Fachpersonal, Forschung, Kommunen, Dienstleister)?
- Wurden Partner gut integriert?
- Wird die Expertise der Partner gut genutzt?
- Wurden andere Kommunen als Unterstützer identifiziert?
- Findet ein regelmäßiger Austausch zwischen dem gebildeten Konsortium statt?
- Ist die Kommune/das Projekt rechtlich abgesichert?

Strategie entwickeln:

Aufgrund der Komplexität und benötigten Ressourcen sollte dem digitalen Zwilling eine eigene Strategie zu Grunde liegen.

Empfehlung: Die Strategie für den digitalen Zwilling in einem iterativen Prozess erstellt, erweitern und anpassen.

Leitfragen:

- Wurden konkrete und klare Projektziele definiert und integriert?
- Wurden konkrete Meilensteine definiert, die eine spätere Evaluierung erlauben?
- Wurde ein Evaluationskonzept entwickelt?
- Wurden klare Aufgaben definiert und den Projektpartnern zugewiesen?

⁶ vgl. <https://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/>

Prozessschritt	Zentrales Ziel	Zentrale Aspekte auf dem Weg zur Zielerreichung
Definition von Problem und Ziel	Klärung der Notwendigkeit der Umsetzung des digitalen Zwillings	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Anwendungsfälle <input checked="" type="checkbox"/> Konkrete Probleme und Ziele <input checked="" type="checkbox"/> Bedarfe und Mehrwerte <input checked="" type="checkbox"/> Stakeholder und Zielgruppe
Zuweisung von Verantwortlichkeiten	Aufbau Projektmanagementstruktur	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Koordination und Steuerung <input checked="" type="checkbox"/> Projektleitung (extern oder intern) <input checked="" type="checkbox"/> Qualifizierung der Projektleitung
Vorhandensein von Ressourcen	Allokation von finanziellen Mitteln, internen personellen Ressourcen und Kompetenzen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Kooperation und Kommunikation <input checked="" type="checkbox"/> Zuständigkeiten <input checked="" type="checkbox"/> Fachbehörden und Fachpersonal <input checked="" type="checkbox"/> Wissensaufbau und Wissenshaltung <input checked="" type="checkbox"/> Know-how <input checked="" type="checkbox"/> Interne Projektunterstützung
Technische Voraussetzungen	Sicherstellung der Verfügbarkeit technischer Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Data Governance <input checked="" type="checkbox"/> Technologien <input checked="" type="checkbox"/> Daten <input checked="" type="checkbox"/> Rechenressourcen <input checked="" type="checkbox"/> Infrastruktur
Stakeholder und Unterstützung (extern)	Nutzung von externem Fachwissen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Identifikation von Partnern mit thematischer Tiefe <input checked="" type="checkbox"/> Identifikation von Partnern mit technischer Expertise <input checked="" type="checkbox"/> Kooperation mit der Bürgerschaft <input checked="" type="checkbox"/> Rechtliche Unterstützung
Strategie entwickeln	Entwicklung der Umsetzungsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Projektziele verfestigen <input checked="" type="checkbox"/> Meilensteine definieren <input checked="" type="checkbox"/> Aufgaben definieren <input checked="" type="checkbox"/> Evaluationskonzept

Tabelle 3: Leitfaden für den Aufbau eines digitalen Zwillings – Checkliste „Voraussetzungen schaffen“

5.2 Umsetzung

Das in Abbildung 13 dargestellte Flussdiagramm zeigt ein idealtypisches Vorgehen. Dies kann als Grundlage zur Umsetzung eines digitalen Zwillings

gesehen werden, jedoch können die einzelnen Schritte je nach Herangehensweise und Anwendungsfall auch variieren. Werden Fragen mit „Ja“ beantwortet, ist die nächste Stufe im Diagramm erreicht; wenn diese mit „Nein“ be-

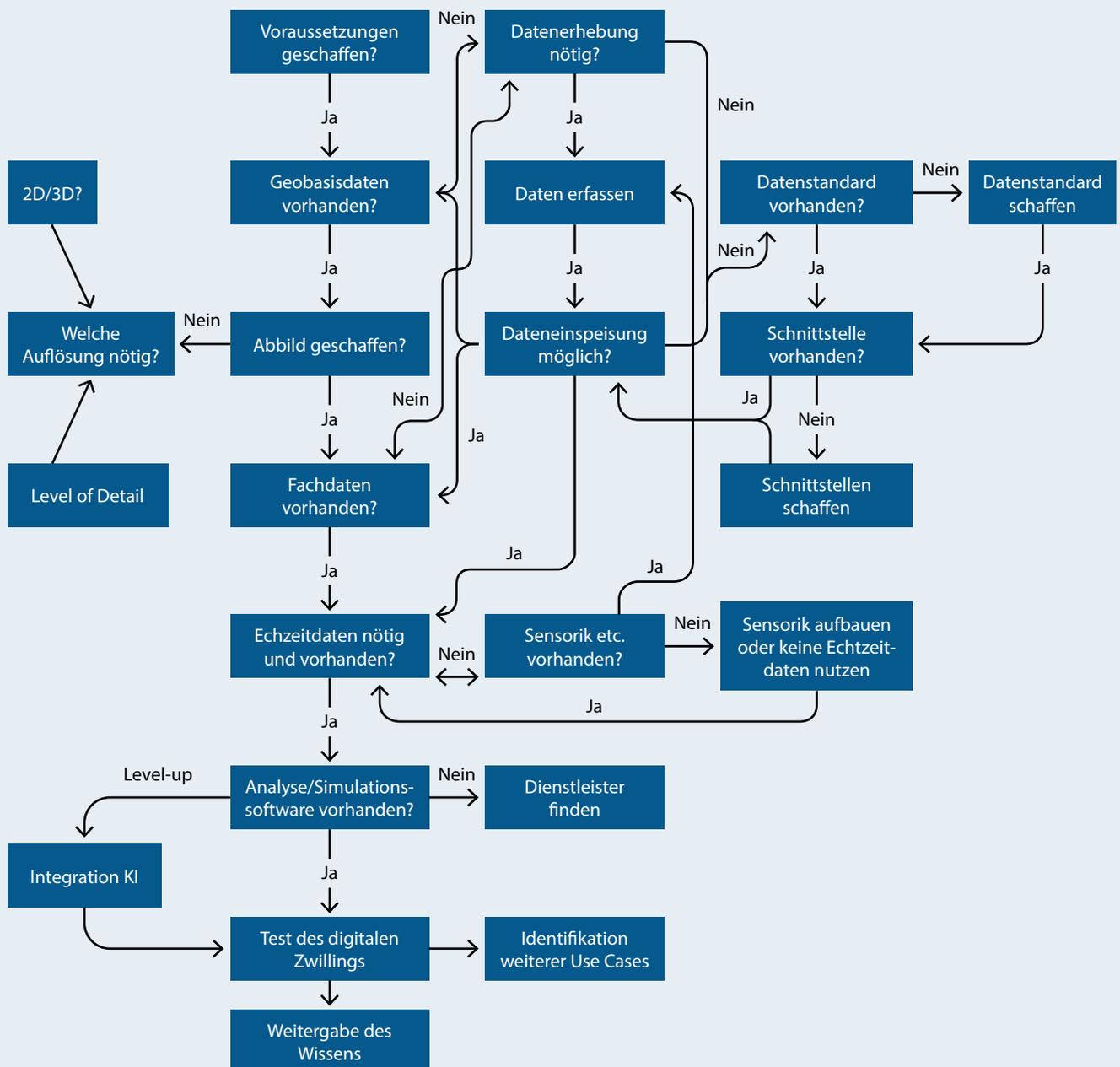
antwortet sind, ist eine Prüfung der weiteren Voraussetzungen notwendig.

Im Rahmen der Umsetzung wird häufig ein 3D-Stadtmodell erzeugt beziehungsweise ein bereits existierendes verwendet. Das Beispiel Mönchengladbach verdeutlicht, dass hier eine erste Visualisierung mit Bestandsdaten bereits zum Ziel führen kann. Der Vorteil dieser Visualisierung ist, dass diese leicht verständlich ist und einfach an verschiedene Stakeholder-Gruppen kommuni-

ziert werden kann. Das Stadtmodell ist darüber hinaus ideal, um im Kontext verschiedener Anwendungsfälle zur Darstellung genutzt zu werden.

Nicht zuletzt sollte man schon während der Umsetzung jedes Anwendungsfalls im digitalen Zwilling nach weiteren Use Cases Ausschau halten. Dies kann durch die Verknüpfung von bereits existierenden Anwendungsfällen oder auch durch die Einbeziehung von nur am Rande beteiligten Fachabteilungen ermöglicht werden.

Abbildung 13: Flussdiagramm „Umsetzung eines digitalen Zwillings“ | Quelle: eigene Darstellung



6 Fazit

Die Studie hat gezeigt, dass der Einsatz von digitalen Zwillingen in Stadtentwicklungsprozessen bisher noch nicht weit verbreitet ist. Die Hypothesen zu den **Beschleunigungspotenzialen von Stadtplanungsprozessen (Forschungsfrage 1)** können daher noch nicht validiert werden. Gleichzeitig befinden sich aber verschiedene deutsche Städte auf dem Weg dorthin. Internationale Fallbeispiele wie Amaravati zeigen bereits jetzt die Potenziale eines digitalen Zwillings für neu zu errichtende Städte auf.

Die heutigen **technologischen Grenzen der Anwendbarkeit (Forschungsfrage 2)** wurden durch die Darstellung der Grobarchitektur eines digitalen Zwillings veranschaulicht. Digitale Zwillinge sind heute auf Basis einer guten Datengrundlage in der Lage, städtische Anwendungsfälle in einem 2D/3D-Modell abzubilden, zu analysieren und darauf aufbauend Simulationen auszuführen. Ergänzend ist der Einsatz von KI (z. B. durch Deep Learning/maschinelles Lernen) bereits heute schon möglich, sofern eine breite Datengrundlage vorhanden ist.

Der digitale Zwilling hat dort großes Potential, wo viele Daten aus verschiedenen Quellen (in kurzer Zeit) bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen. Es wurde gezeigt, dass im Rahmen

der MPSC viele Kommunen dieses Potential erkannt haben und gerade dabei sind, Anwendungsfälle in die Praxis zu bringen. Weiterhin eignen sich repetitive, klar definierbare Prozesse für die Umsetzung im digitalen Zwilling. Dies zeigt zugleich auch die Grenzen eines solchen Systems auf.

Zukünftige Forschungen werden zeigen müssen, ob der digitale Zwilling in der Lage ist, **weitere Mehrwerte** wie zum Beispiel eine höhere Zufriedenheit der Stadtgesellschaft durch transparentere Prozesse zu erzeugen. Die **Umsetzung der digitalen Zwillinge** in umfassendere Reifegrade und Anwendungsfälle wird Zeit in Anspruch nehmen. Auch wenn heute schon digitale Abbilder vorhanden sind, bedarf es einer besseren Datengrundlage, um gerade diese Anwendungsfälle effizienter umzusetzen. Weitergehende Analysen, Simulationen und der Einsatz von KI sind zwar bereits heute technisch möglich, stehen jedoch in der Umsetzung noch eher am Anfang ihrer Entwicklung. Sensorik und Kommunikationstechnologien werden derzeit in vielen MPSC eingesetzt, um Grundlagen zu schaffen, aber es wird einige Zeit dauern, diese Daten in den digitalen Zwilling zu integrieren und für Analysen und Simulationen zu nutzen. Insbesondere die Verfügbarkeit von Daten über längere Zeiträume ist hier für zukünftige Arbeiten betrachtenswert.

Literatur

Airaksinen, E.; Bergstrom, M.; Heinonen, H.; Kaisla, K.; Lahti, K.; Suomisto, J., 2019: The Kalasatama digital twins project – The final report of the KIRA-digi pilot project. Technical report, City of Helsinki.

Austin, M.; Delgoshaei, P.; Coelho, M.; Heidarinejad, M., 2020: Architecting Smart City Digital Twins: Combined Semantic Model and Machine Learning Approach. In: J. Manage. Eng. 36. Jg. (4), Artikel 04020026.

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2023 (im Erscheinen): Datenstrategien in Kommunen. Unveröffentlichtes Dokument.

Blankenbach, J., 2022: Digitaler Zwilling – Hype oder Booster für unsere Wirtschaft? Zugriff: <https://www.intergeo.de/de/news/digitaler-zwilling-hype-oder-booster> [abgerufen am 17.04.2023].

de Lange, N., 2020: Geoinformatik in Theorie und Praxis. Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung. 4., grundlegend überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg.

Dembski, F.; Wössner, U.; Letzgus, M.; Ruddat, M.; Yamu, C., 2020: Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. In: Sustainability 12. Jg. (6): 2307.

Deren, L.; Wenbo, Y.; Zhenfeng, S., 2021: Smart City based on digital twins. In: Comput.Urban Sci. 1. Jg. (1): 1–11.

European Commission, 2019: Rotterdam's Digital Twin Redefines Our Physical, Digital, & Social Worlds.

Hein, R; Heinecke, F; Liebisch, M.; Wille, T., 2018: Vom virtuellen Produkt zum digitalen Zwilling - Faserverbundleichtbau 4.0. Vortrag zum FA-Wissenschaftstag 2018. In-Situ Strukturbewertung während der Fertigung – Geburt des digitalen Zwillings. 18.10.2018, Braunschweig.

Jansen, M., 2019: Digital Twins for Greenfield Smart Cities. Zugriff: <https://newcities.org/the-big-picture-digital-twins-for-greenfield-smart-cities/> [abgerufen am 17.04.2023].

Krause, K.; Duan, X.; Horenczuk, J.; Leuner, H., 2020: XPlanung und XBau – Auf dem Weg zu einem verlustfreien Austausch von Bauleit-, Raumordnungs- und Landschaftsplänen. In: IzR – Informationen zur Raumentwicklung, 47. Jg. (3): 6–21.

Lim B., 2020: Digitaler Zwilling- Hype oder Hoffnung? Zugriff: <https://www.yokogawa.com/eu/blog/renewables/de/digitaler-zwilling/> [abgerufen am 17.04.2023].

Lu, Q.; Parlikad, A. K.; Woodall, P.; Don Ranasinghe, G.; Xie, X.; Liang, Z.; Konstantinou, E.; Heaton, J.; Schooling, J., 2019: Developing a dynamic digital twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus. Journal of Management in Engineering 36.

Panetta, K., 2016: Gartners Top 10 Technology Trends 2017. Zugriff: <https://www.gartner.com/smarter-withgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017> [abgerufen am 17.04.2023].

Ricci, A.; Croatti, A.; Mariani, S.; Montagna, S.; Picone M., 2022: Web of Digital Twins. ACM Transactions on Internet Technology.

Schrotter, G.; Hürzeler, C., 2020: The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. 88. Jg. (1): 99–112.

Shahat, E.; Hyun, C.; Yeom C., 2021: City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. Sustainability.

Souza, L.; Bueno, C., 2022: City Information Modelling as a support decision tool for planning and management of cities: A systematic literature review and bibliometric analysis. In: Building and Environment 207, Artikel 108403.

Triangulum Project, 2023: Stadt Eindhoven. Zugriff: https://triangulum-project.eu/?page_id=2137 [abgerufen am 17.04.2023].

van der Valk, H.; Haße, H.; Möller, F.; Otto, B., 2021: Archetypes of Digital Twins. In: Business & Information Systems Engineering, 64. Jg. (3): 375–391.

Vestner, R., 2022: Nachhaltige Stadtentwicklung: Wie digitale Zwillinge dazu beitragen. Zugriff: <https://www.autocad-magazin.de/nachhaltige-stadtentwicklung-wie-digitale-zwillinge-dazu-beitragen/> [abgerufen am 17.04.2023].

Weber, U.; Grosser, H., 2019: Digitale Zwillinge: Wegbereiter für Ökosysteme von morgen, Detecon International GmbH. Zugriff: https://www.detecon.com/drupal/sites/default/files/2019-10/ST_Digitaler_Zwilling_final_online_091019_0.pdf [abgerufen am 17.04.2023].

Wollschläger, J., 2018: Der digitale Zwilling – Erwartungen und Einschätzungen der deutschen Bevölkerung mit besonderem Fokus auf Diabeteserkrankungen, PricewaterhouseCoopers GmbH. Zugriff: <https://www.pwc.de/de/gesundheitswesen-und-pharma/pwc-studie-der-digitale-zwilling.pdf> [abgerufen am 17.04.2023].

