



Der Digitale Zwilling für smarte Städte – zwischen Erwartungen und Herausforderungen

Was wir in der Zukunft erwarten können und wo wir heute stehen

Inhalt

Einleitung	4
Überblick	7
Definition & Grundlagen	8
Digitaler Zwilling für Smarte Städte	10
Erwartungen & praktische Umsetzung	12
Ausgewählte Use Cases	19
Intelligente Mobilität	20
Höhere Lebensqualität & bessere Gesundheit	22
Herausforderungen	27
Komplexität in der Smart City & Umsetzung eines Digitalen Zwillings	28
Ausblick auf ethische Aspekte	31
Fazit	33
10 Thesen zum Digitalen Zwilling in der Smart City	35



Einleitung

Ist der Digitale Zwilling das Herzstück einer Smart City?

500
Städte sollen
im Jahr 2025
einen Digitalen
Zwilling nutzen

Die Entwicklung von Smart Cities im Sinne der Smart City Charta hat in Deutschland für das Aufkommen eines neuen Trends gesorgt: die **konzeptionelle** Übertragung von »Digitalen Zwillingen« aus der Industrie und Weltraumforschung auf das Management von intelligenten Städten. Bei der NASA und anderen wurde bereits vor zehn Jahren mit dem Digitalen Zwilling ein Konzept beworben, das kostengünstigere Tests von Fluggeräten mittels digitaler Modelle ermöglicht. Anstelle teurer Tests mit realen Fluggeräten sollten Testflüge mit Digitalen Zwillingen ermöglicht werden, um grundlegende Erprobungen virtuell durchzuführen, bevor ein realer Prototyp für weitere Testflüge genutzt wurde.

Nach einer Studie von ABIresearch könnten schon im Jahr 2025 mehr als 500 Städte weltweit mit Digitalen Zwillingen arbeiten. Die Verfasserinnen der Studie gehen davon aus, dass das Konzept des Digitalen Zwillings in den nächsten Jahren zu einem prägenden Leitbild europäischer Stadtentwicklungsprozesse werden könnte. Die Motivation der vorliegenden Publikation besteht daher darin, eine anwendungsorientierte Einordnung dieses Technologietrends vorzunehmen, um sowohl Fördermittelgebern als auch Kommunen einen Überblick darüber zu vermitteln, **welche Möglichkeiten das Konzept des »Digitalen Zwillings« beinhaltet und welche technologischen und organisationalen Voraussetzungen gegeben sein müssen**, damit sich dessen volles Potenzial

entfalten kann.

Folgende Leitfragen stehen im Zentrum:

- Was wird aktuell unter »Digitalen Zwillingen für smarte Städte« verstanden?
- Welche Erwartungen werden an Digitale Zwillinge für smarte Städte formuliert und wie realistisch sind diese?
- Welche Potenziale des Digitalen Zwillings können kurz-, mittel- und vor allem langfristig im Kontext einer Smart City gehoben werden?
- Welche bisher nicht adressierten Herausforderungen müssen überwunden werden, um die Potenziale von städtischen Digitalen Zwillingen zu ermöglichen?

Das Konzept »Digitaler Zwilling« besitzt aktuell eine hohe Präsenz in politischen Debatten und wird dabei in seiner Relevanz für Städte sehr unterschiedlich interpretiert. Wir vermuten daher, dass der Digitale Zwilling in seiner konzeptionellen Formulierung - beispielsweise in laufenden Fördervorhaben - noch nicht das Potenzial und die immensen Herausforderungen widerspiegelt, die in den besonderen Eigenschaften eines vollständig realisierten Digitalen Zwillings verborgen liegen. Daher beginnen wir im Folgenden mit einer präzisierenden Definition und einem Überblick zum Digitalen Zwilling. Ein initiales Reifegradmodell für smarte Städte soll anschließend eine Orientierung für aktuelle und zukünftige Realisierungsvorhaben geben.







Überblick Digitaler Zwilling

Definition & Grundlagen	8
Digitaler Zwilling für Smarte Städte	10
Erwartungen & Herausforderungen in der praktischen Umsetzung	12



Definition & Grundlagen

Das Konzept des Digitalen Zwillings, das aus der Erprobung von Avionik-Systemen entsprang, beschreibt einfach gesagt die Abbildung von realen »Dingen« in der virtuellen bzw. digitalen Welt. Auf diese Weise können nicht nur Produkte, Maschinen oder Produktionsanlagen mit Digitalen Zwillingen abgebildet werden, sondern künftig auch komplette Städte inklusive der dort realisierten Prozesse und digitalen Dienste. Soweit die Erwartungen, die man an den Digitalen Zwilling in der Smart City schürt.

Heute findet der Digitale Zwilling hierzulande zunehmend Anwendung im Rahmen der IT-Infrastruktur für die Industrie 4.0. Dort wird er eingesetzt, um real existierende Systeme (z.B. Produktionsanlagen) auf Basis anfallender Daten zu beschreiben und virtuell nachzubilden. Wird er um ein Simulationsmodell ergänzt, kann der Digitale Zwilling dann genutzt werden, um das zugrundeliegende System zu analysieren und ggf. Vorhersagen über dessen Verhalten zu treffen. Das wiederum unterstützt geschäftsrelevante Entscheidungen, etwa im Hinblick auf Zustand und Produktivität des Systems. Die zunehmende Nutzung von Digitalen Zwillingen im Kontext von Industrie 4.0 findet vor allem aufgrund der Verbesserung der zugrundeliegenden Technologien (IoT, Big Data etc.) statt. Darüber hinaus ist aber auch ein Paradigmenwechsel hin zu einer

flexiblen, vernetzten Produktion mit hochgradig individualisierbaren Produkten maßgeblich für den Trend verantwortlich.

Der Digitale Zwilling ist dabei ein vereinfachender Sammelbegriff für mehrere miteinander verknüpfte Aspekte. Wie bereits erwähnt, bezeichnet er zunächst das virtuelle Spiegelbild physischer Objekte in Form von Daten und Algorithmen. Wir fassen an dieser Stelle den Begriff des Objektes weiter und sprechen von Assets – Assets in einem Digitalen Zwilling können Objekte, Subjekte und Prozesse sein.

Dieses Spiegelbild beschreibt die realen Gegenstände und deren Verhalten unter bestimmten Bedingungen. Der Digitale Zwilling steht dabei über Sensoren, Busse und Netzwerke in einer Echtzeitverbindung zur realen Welt. Gleichzeitig können Veränderungen in der physischen Welt gesteuert werden. Diese Verknüpfung erlaubt somit ein dynamisches und präzises Management von komplexen Systemen und Abläufen.

Das Konzept des Digitalen Zwillings definiert sich demnach in erster Linie durch die **bidirektionale Echtzeitverbindung zwischen physischer und digitaler Komponente** sowie die damit einhergehende Möglichkeit zur Überwachung, Simulation/Vorhersage und ggf. automatisierten Reaktion.



Ein digitaler Zwilling ist eine digitale Repräsentanz eines materiellen oder immateriellen Objekts oder Prozesses aus der realen Welt in der digitalen Welt. Es ist unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt bereits existiert oder zukünftig erst existieren wird. ...«

de.wikipedia.org/wiki/Digitaler_Zwilling

Definition Digitaler Zwilling in der Übersicht

Komponenten:

- Physisches Asset (Realität)
- Digitales Asset (Repräsentation)

Eigenschaften:

- Echtzeitsynchronisation zwischen Realität und Repräsentation (bidirektionaler Informationsfluss)
- Domänenabhängigkeit (spezialisiert auf eine bestimmte Anwendung)
- Eigenständige Weiterentwicklung im Sinne von Maschinellem Lernen (fortlaufendes Lernen & Anpassen im realen System)

Technologien & Daten:

- Ende-zu-Ende-Kommunikation (herstellerübergreifende Kommunikation zur Sicherstellung des Datenflusses)
- IoT-Geräte (Sammeln von Echtzeitdaten)
- Big Data (zeitkontinuierliche Daten als Grundlage)
- Maschinelles Lernen (Vorhersagen & Handlungsstrategien)
- Datensicherheit (Schutz des Informationsflusses zwischen Komponenten)

In aktuellen Forschungsarbeiten wird das Konzept des Digitalen Zwillings auch in vielen weiteren Anwendungsgebieten propagiert, wie beispielsweise in der Landwirtschaft als sog. Digitaler Feldzwilling. Dies lässt zunächst einmal den Schluss zu, dass die Anwendungen des Konzepts Digitaler Zwilling für smarte Städte näher untersucht werden sollten.

Digitaler Zwilling für smarte Städte

Die Kombination der vielfältigen Technologien unterscheidet den Digitalen Zwilling von bisherigen Smart-City-Ansätzen, wie etwa (intelligenten) Informationssystemen, Geoportalen, 3D-Simulationen oder Dashboards.

Die Übertragung des Konzeptes Digitaler Zwilling auf die Digitalisierung von Städten ermöglicht es uns, über neuartige Lösungen **auf Basis einer fortgeschrittenen Smart-City-Infrastruktur** nachzudenken. Dabei ist ein Digitaler Zwilling sicher kein klassisches Einstiegs-Smart-City-Projekt, da es einige Voraussetzungen benötigt. Es bietet aber ein großes Potenzial, Mehrwerte auf Basis von klassischen etablierten Ansätzen, wie z.B. Geoportalen, Datenplattformen und ähnlichem zu schaffen, die bereits in den heutigen Smart Cities weit verbreitet sind.

Die Einsatzszenarien in der Stadt sind sehr vielfältig. **Grundlage ist die Zusammenfassung von Daten aus unterschiedlichen Quellen.** Sind diese mit einer einheitlichen

Schnittstelle verfügbar, so hat dies bereits einen eigenen Vorteil. In der nächsten Stufe geht es dann häufig darum, eine digitale Repräsentanz der Stadt aufzubauen, um im weitesten Sinne urbane Planungsszenarien zu unterstützen. Digitale Zwillinge ermöglichen Simulationen und Planungen, bevor diese umgesetzt werden, insbesondere, um möglicherweise auftretende Probleme zu erkennen, bevor diese Realität werden.

Aktuelle Studien und Projekte zu Digitalen Zwillingen in der smarten Stadt beschäftigten sich vor allem mit technischen, organisatorischen und sozialen Fragestellungen. Dabei fällt auf, dass es in der Wissenschaft und Praxis noch kein einheitliches Verständnis für die Verwendung des Begriffs Digitaler Zwilling im Kontext einer Smart City gibt. Häufig wird dabei irreführenderweise der Digitale Zwilling für verschiedene Ausprägungen von intelligenten Lösungen verwendet, ohne dabei formell Kriterien eines echten Digitalen Zwillinges zu berücksichtigen. Hier soll diese Publikation helfen, eine Einordnung auf der Grundlage des später skizzierten Reifegradmodells zu ermöglichen. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht, welche Anwendungsbereiche aktuell besonders häufig in Praxisbeispielen umgesetzt werden.

Häufigkeit von Anwendungsbereichen aktueller Quellen zu Digitalen Zwillingen in Wissenschaft und Praxis:

Häufigkeit der Bearbeitung in wissenschaftlichen Publikationen

Hoch

Mittel

Niedrig

Anwendungsbereich

- Städtische Infrastruktur & Verwaltung
- Gebäudeverwaltung & Instandhaltung
- Verkehrsfluss, Mobilität & ÖPNV

- Energieversorgung & Effizienzgewinn
- Katastrophen- & Risikomanagement
- Strat. Stadtplanung & Organisation
- Demokratie & Bürgerbeteiligung
- Lebensqualität, Gesundheit & Barrierefreiheit

- Soziales, Gemeinschaft & Ehrenamt
- Umweltbeobachtung & -bewertung

Während ein Teil der publizierten Forschungsergebnisse sich mit der rein technischen Perspektive von Digitalen Zwillingen von Städten beschäftigen, beschreiben die meisten Arbeiten potenzielle Anwendungsgebiete zur Verbesserung bestehender Systeme und Prozesse.

Darüber hinaus führen Städte weltweit Realisierungsvorhaben in verschiedenen Anwendungsfeldern durch, die durch wissenschaftliche Studien begleitet werden. Eine Auswahl an Städten (s.u.) deckt dabei eine große Bandbreite an möglichen städtischen Aufgabenbereichen für Digitale Zwillinge ab.

Stadt	Themenfeld Realisierungsvorhaben
<u>Herrenberg, Deutschland</u>	<u>Demokratische Stadt & Bürgerbeteiligung</u>
<u>Zuromin, Polen</u>	<u>Soziale Gemeinschaft & Nachhaltigkeit</u>
<u>Cambridge, England</u>	<u>Koevolution technischer/ sozialer Systeme</u>
<u>Houston, USA</u>	<u>Katastrophenmanagement & Ehrenamt</u>
<u>Taipei, Taiwan</u>	<u>Umweltbeobachtung & Luftverschmutzung</u>
<u>London, England</u>	<u>Energieversorgung (Strom, Wärme etc.)</u>
<u>Valencia, Spanien</u>	<u>Bau & Instandhaltung Wasserversorgung</u>
<u>Sejong, Südkorea</u>	<u>Risikobewertung bzgl. Bodenverflüssigung</u>
<u>Tianjin, China</u>	<u>3D-Stadtvisualisierung, GIM/ BIS-Fusion</u>
<u>Singapur</u>	<u>Ganzheitlicher Ansatz (Vision = Kombination verschiedener Use Cases zur Erhöhung der allgemeinen Lebensqualität in der Stadt)</u>

Die aufgeführten städtischen Realisierungsvorhaben sind dabei – aus Perspektive der Verfassenden – ein Schritt in die Richtung eines Digitalen Zwillinges in der Smart City, aber oft noch in einer frühen Phase. Häufig sind dies Einzelvorhaben. **Einen umfassenden Nutzen kann ein Digitaler Zwilling allerdings erst entfalten, wenn er möglichst integriert über verschiedene Anwendungsbereiche gedacht wird, respektive wenn in einer Stadt mehrere vernetzte Vorhaben auf Basis der Konzepte zum Digitalen Zwilling umgesetzt sind.**

Somit beschränkt sich der Einsatz bisher größtenteils auf bestimmte Anwendungsfälle, z.B. eine Lösung für das Gebäudemanagement, doch eine umfassende Repräsentation einer Stadt in allen Facetten bleibt vorerst visionär. Gleichzeitig können Städte Einzelkomponenten, die Grundlagen oder Bausteine eines entsprechenden Digitalen Zwillinges sein können, bereits erwerben, etwa **Datenplattformen** oder **Simulationssoftware**. Ein sofort einsetzbares System wird allerdings nicht angeboten. Zwar stehen die grundlegend benötigten Technologien zur Verfügung, beispielsweise im Hinblick auf Big Data, IoT (Internet der Dinge) und KI (Künstliche Intelligenz), jedoch mangelt es an entsprechenden Standards und Best Practices in diesem spezifischen Kontext.



Erwartungen & praktische Umsetzung

Digitaler Zwilling - die Zukunft für deutsche Städte?

Um die aktuell realisierten Potenziale und noch offenen Herausforderungen kommunaler Vorhaben rund um Digitale Zwillinge für andere städtische Initiativen sinnstiftend einzuordnen, wird im Folgenden insbesondere die Differenz zwischen Erwartungen und Möglichkeiten aufgezeigt. Darauf aufbauend wird ein Reifegradmodell vorgestellt, das es Städten ermöglichen soll, eine Selbsteinordnung vorzunehmen.

Erwartungen

Woher kommt der aktuell starke Trend zum Konzept des Digitalen Zwillings in der Smart-City-Community in Deutschland? Stadtplaner und Chief Digital Officers (CDOs) versprechen sich von einem dynamischen und datenbasierten Abbild einzelner Quartiere oder ganzer Städte eine verbesserte Grundlage für die Analyse, Steuerung und Optimierung z.B. städtischer Prozesse, Verkehrsflüsse, Infrastrukturen und Umweltsysteme sowie das Simulieren und Testen von Veränderungen im städtischen System.

Die möglichen Vorteile eines integrierten Echtzeit-Analyse- und Steuerungssystems, wie es bei einem Digitalen Zwilling möglich wäre, sind groß:

Abstrakte allgemeine Vorteile:

- Vorausschauende Wartung von Infrastruktur
- Erhöhte Ressourceneffizienz
- Echtzeit-Monitoring
- Verbessertes Risikomanagement
- Verbesserte Entscheidungsfindung
- Verbesserte Kollaborationsmöglichkeiten
- Ermöglichung neuartiger Geschäftsmodelle

Vorteile aus konkreten Anwendungsbereichen:

- Analyse und Vorausplanen von Anpassungen der städtischen Infrastruktur ohne besonderen Aufwand und auf extrem granularem Level.
- Umsetzung der Reaktion auf die dynamische Entwicklung einer Stadt in unterschiedlichen Domänen (Verkehr, Soziales, Gesundheit o.Ä.) in Echtzeit.
- Vereinfachte Kollaboration (mittels Visualisierungen etc.) in komplexen Ökosystemen.
- Modellierung und Simulation von Extrem- und Gefahrensituationen, Szenarien der Infrastrukturauslastung, Katastrophenschutz.
- Flexible umweltbeeinflussende Maßnahmen im Sinne der nachhaltigen Stadtentwicklung



Die Potentiale von Digitalen Zwillingen für Städte sind gigantisch. Wir benötigen mutige Kommunen, die den praktischen Nutzen für Deutschland aufzeigen.«

durch konstante Überwachung der Luft- und Wasserqualität sowie der Lärmbelastung.

- Überwachung von Individualverkehr und ÖPNV in Echtzeit und Optimierung durch Analysen.
- Erhöhung der Transparenz bzgl. privater und öffentlicher Bauvorhaben, da stets aktuelle Informationen zu ebendiesen abrufbar sind. Langfristige Dokumentation und Bereitstellung der Historie zu Gebäuden.

Herausforderungen

Während der Digitale Zwilling offensichtlich großes Potenzial für die Zukunft bietet, gilt es allerdings auch einige Limitationen und Herausforderungen zu beachten. So ist die Umsetzbarkeit bisher größtenteils noch auf bestimmte Anwendungsfelder beschränkt, und eine umfassende Repräsentation eines großen, komplexen Gesamtsystems (etwa einer ganzen Stadt) in allen Facetten bleibt wohl vorerst visionär. Dies liegt größtenteils daran, dass Voraussetzungen wie z.B. die Verfügbarkeit von Daten häufig nicht flächendeckend und vor allem nicht domänenübergreifend gegeben sind.

Möglich wäre es, eine Umsetzung zunächst auf Quartiers-ebene anzudenken und dies dann Schritt für Schritt auf das komplette Stadtgebiet auszuweiten.

Um die Lücke zwischen dem heutigen Stand und der zukünftigen Realisierung eines städtischen Digitalen Zwillings zu erfassen, lohnt es sich, die mit einer Umsetzung einhergehenden Herausforderungen realistisch in den Blick zu nehmen:

1. Welche Teilbereiche können schon heute mit Softwarelösungen am Markt abgedeckt werden und welche Bereiche benötigen eine Individuallösung?
2. Sollte eine smarte Stadt selbst einen Digitalen Zwilling entwickeln und dabei die Kooperation mit anderen Städten zulassen/ermöglichen?
3. Wie muss die Bevölkerung der Städte in die Konzeption und den Betrieb des Digitalen Zwillings involviert werden, insbesondere im Hinblick auf mögliche Konsequenzen automatisierter Entscheidungsprozesse zur Laufzeit des Systems?
4. Wie wird eine ganzheitliche Verknüpfung komplexer und in Entwicklung befindlicher Teil-Technologien erreicht?
5. Wie gelingt die Integration vieler und häufig nicht interoperabler und heterogener Systeme bzw. Datenquellen? **In Städten existieren heute eine Vielzahl heterogener Systeme und gewachsener Infrastrukturen, deren Interoperabilität teilweise »by Design« der Hersteller der Systeme nicht gewünscht ist. Problematisch ist dabei nicht nur die (redundante) Datenhaltung und die daraus entstehende Notwendigkeit zur Pflege unterschiedlicher Datenbanken, sondern auch die**

Isolation der bestehenden Systeme, die durch proprietäre Schnittstellen und Datenformate verstärkt wird.

6. Wie lässt sich die Vernetzung vieler verschiedener, teilweise kritischer Domänen einer Stadt über Sektoren- und Organisationsgrenzen operationalisieren?
7. Wie können soziale und ökologische Faktoren noch stärker in die Konzeptionierung Digitaler Zwillinge involviert werden?
8. Wie kann der Bedarf an qualifiziertem IT-Personal in den Kommunen gedeckt werden?
9. Wie können fehlende Standards und Best Practices geliefert werden?

Versuch eines Reifegradmodells:

Die sehr hohen Erwartungen an das Konzept des Digitalen Zwillings, gepaart mit den vielfältigen Herausforderungen, haben uns veranlasst, mit dem hier beschriebenen Reifegradmodell einen Ansatz zu bieten, der eine grundlegende Einordnung der eigenen Stadt ermöglicht. Damit einhergehend soll die Frage beantwortet werden, ob eine Stadt die notwendigen Grundlagen geschaffen hat, um sich mit der Umsetzung von Digitalen Zwillingen zu befassen.

Stellt man die zukünftigen Mehrwertpotenziale eines realisierten städtischen Digitalen Zwillings dem aktuellen Stand von Projekten und technologisch sowie organisationalen Herausforderungen gegenüber, ergibt sich das in Abbildung 1 dargestellte Reifegradmodell. Wir gehen davon aus, dass eine Stadt in jeder Stufe eine gewisse Zeitspanne verbringt, bevor es sinnvoll ist, in die nächste Stufe aufzusteigen. Kriterien für die Einordnung sind: Voraussetzungen im Rahmen des städtischen Managements, im Bereich Technologie und Forschung sowie der Nutzen im Zusammenspiel mit der Bürgerschaft. Die folgende Tabelle zeigt hier eine erste Darstellung der Voraussetzungen und Anforderungen.

Wo befinden wir uns auf dem Weg zum Digitalen Zwilling in der Smart City? Ein erster Versuch für ein Reifegradmodell soll Städten helfen, eine Einordnung zu finden.



Erster Versuch eines Reifegradmodells zum besseren Verständnis Digitaler Zwillinge in der Smart City

Stufe	Aufwand bis zur nächsten Stufe	Städtisches Management	Technologie und Forschung	Bürgerschaftliche Relevanz
1) Digitaler Zwilling ist weitgehend unbekannt	wenige Jahre	<ul style="list-style-type: none"> DZ ist nicht im städtischen Management als Thema verankert 	<ul style="list-style-type: none"> keine Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> DZ ist unbekannt und irrelevant
2) Digitaler Zwilling ist ein interessantes Konzept	1-3 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> DZ ist für einzelne Teile des städtischen Managements als Zukunftsthema relevant (bspw. CIO/CTO) 	<ul style="list-style-type: none"> Daten-Dashboards oder 3D-Modelle der Stadt werden für einzelne Aufgaben genutzt Ggf. werden sensorische Daten automatisiert in Dashboards/Modelle übertragen 	<ul style="list-style-type: none"> DZ ist teilweise bekannt, wird aber nicht im Kontext der Stadt gesehen
3) Digitaler Zwilling wird erprobt und bietet erste Mehrwerte	2-3 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> Städtisches Management nutzt die geschaffenen Grundlagen des DZ für die umfassendere Analyse einzelner relevanter Herausforderungen DZ ist operativ ein komplexes und aufwändiges Thema der Fachlichkeit & Technik Im städtischen Management müssen ggf. zusätzliche Kompetenzen im Bereich IT aufgebaut werden (Daten, Simulation) 	<ul style="list-style-type: none"> Grundlegende technische und organisationale Herausforderungen müssen gelöst werden (Digitalisierung, Datenerhebung und -integration, Software). Einzelne Domänen werden in einen nicht bidirektionalen DZ-Prototyp übertragen (d.h. keine Steuerung zwischen Digitalem und physischem Zwilling) 	<ul style="list-style-type: none"> Teile der interessierten Bürgerschaft nehmen Notiz oder nutzen die bisher geschaffenen Grundlagen (Daten, Software)



Stufe	Aufwand bis zur nächsten Stufe	Städtisches Management	Technologie und Forschung	Bürgerschaftliche Relevanz
<p>4) Digitaler Zwilling ist in Betrieb und verändert die städtische Managementkultur</p>	<p>3-10 Jahre</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ In einzelnen Domänen nutzt das städtische Management den DZ, um einfachere Entscheidungen zu treffen und komplexe Probleme zu analysieren ■ Organisation, Prozesse und Kultur des städtischen Managements werden durch die Nutzung des DZ verändert. ■ Teile der steuerbaren Infrastruktur werden durch bidirektionalen DZ gesteuert ■ Zusätzliche interdisziplinäre Kompetenzen (aus Sozialforschung, Informatik, Engineering und weitere) werden nötig, um besonders anspruchsvolle Domänen zu integrieren (bspw. Soziales) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Einzelne Domänen werden in einen bidirektionalen DZ übertragen und für konkrete städtische Aufgaben genutzt (bspw. Verkehrsmanagement) ■ Für die Modellierung besonders anspruchsvoller Domänen (bspw. Soziales) werden intensiv Forschungsmittel genutzt ■ Die nötige technische Infrastruktur für den Betrieb des DZ wird deutlich komplexer und anspruchsvoller. Sie muss in der Lage sein, sehr große und häufig aktualisierte Datenmengen kontinuierlich zu managen und sinnvoll einzusetzen. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ehrenamtlich oder allgemein engagierte Bürger können den DZ bzw. seine veröffentlichten Informationen für Ziele nutzen ■ Der DZ kann ergänzende Hilfestellung für bürgerschaftliche Initiativen bilden

Stufe	Aufwand bis zur nächsten Stufe	Städtisches Management	Technologie und Forschung	Bürgerschaftliche Relevanz
5) Digitaler Zwilling ist ein Kern der Stadt und verändert das städtische Gefüge	Die höchste Stufe wurde erreicht.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Stadtmanagement bezieht Strategie und Maßnahmen auf die Grundlagen des DZ ■ Teile des Stadtmanagements werden in Organisation, Prozessen und Kultur durch die Nutzung des DZ geprägt. ■ Anpassungen an steuerbarer Infrastruktur insgesamt durch bidirektionalen DZ ■ Automatisierung von bestimmten Aufgaben (wäre möglich) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle relevanten Domänen einer Stadt werden durch DZ erfasst und sind in einen gemeinsamen DZ integriert ■ Vollständige bidirektionale Verknüpfung zwischen Digitalem und physischem Zwilling ■ Die nötige technische Infrastruktur ist immens anspruchsvoll und übersteigt wahrscheinlich die technischen und budgetären Fähigkeiten der meisten zukünftigen Städte weltweit. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bürgerschaft kann konkrete Initiativen aus dem DZ generieren ■ Bürgerschaft aus jedem Bereich kennt und nutzt den DZ regelmäßig

Das vorgestellte Reifegradmodell zeigt auf, dass die tatsächliche Realisierung eines Digitalen Zwillings im städtischen Kontext in der Zukunft liegt. Es ermöglicht jedoch, **vorausschauend zu handeln**, da als erster Ansatz abgeleitet werden kann, welche Strukturen in der Stadtverwaltung geschaffen

werden müssen, wie Technologie eingesetzt wird und welche Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft zu erwarten sind. Im Folgenden wird auf zwei Anwendungsfälle eingegangen, die zusätzlich den aktuellen Stand und zukünftige Entwicklungspotenziale aufzeigen.





Ausgewählte Use Cases

Intelligente Mobilität	20
Höhere Lebensqualität & bessere Gesundheit	22

Weltweit werden in Realisierungsvorhaben Anwendungsfälle für städtische Digitale Zwillinge in unterschiedlichem Umfang erprobt und besonders relevante Fragestellungen zur Realisierung eines Digitalen Zwillings erforscht. Anhand von zwei Anwendungsfällen (Mobilität & Lebensqualität) wollen wir den aktuellen Stand der Vielzahl an Vorhaben und die zukünftigen konkreten Potenziale dieser Entwicklung aufzeigen.

Intelligente Mobilität

Digitale Zwillinge haben das Potential, die Art wie wir Mobilität wahrnehmen grundlegend zu ändern.

Ein häufiges Beispiel, das man mit dem Konzept des Digitalen Zwillings verbindet, ist die Steuerung von Verkehrsflüssen im Sinne einer intelligenten Mobilität. Im Rahmen der Herstellung von Fahrzeugen wird das Konzept des Digitalen Zwillings vor allem für die technische Entwicklung einzelner Fahrzeuge eingesetzt.

Die Technologie der Digitalen Zwillinge kann aber auch außerhalb des unmittelbaren Rahmens des einzelnen Fahrzeugs die Verkehrs- und Mobilitätsinfrastruktur einer Stadt modellieren. Besondere Vorteile lassen sich erzielen, wenn Technologien wie SUMO in Kombination mit Echtzeit-Sensordaten eingesetzt werden, um den Verkehrsfluss zu überwachen und vorherzusagen und diese Informationen in den aktiven Betrieb zu integrieren. Eine prominente Fallstudie in der **Stadt Herrenberg** integrierte einen Digitalen Zwilling des physischen Stadtlayouts und der Straßentopologie mit der Überwachung des Verkehrsflusses und der Luftstromanalyse, um die Auswirkungen des Verkehrsmusters und der Wetterbedingungen auf die Emissionswerte

vorherzusagen. Diese Informationen wurden dann verwendet, um die Auswirkungen verschiedener Verkehrsplanungsszenarien zur Reduzierung von Staus und Umweltverschmutzung zu bewerten. Weiterhin werden die Simulationen und ergänzende Visualisierungen verwendet, um eine aktive Bürgerbeteiligung während der Planungsphase zu unterstützen. Bei diesem Szenario gibt es noch keine tatsächliche Echtzeit-Rückkopplung in die reale Welt. Dazwischen liegen aktuell noch sehr viele manuelle Planungsschritte.

Auf dem Weg zu einem Digitalen Zwilling würden z.B. leistungsfähige Software-systeme in der kompletten Prozesskette benötigt, die eine automatisierte Rückkopplung ermöglichen würden.

Mit zunehmender Elektrifizierung, Automatisierung und Diversifizierung der öffentlichen Verkehrsmittel werden die Wechselwirkungen zwischen der Mobilität und verschiedenen Aspekten der städtischen Infrastruktur, ihrer Umwelt und den Bewohnern in Zukunft immer komplexer werden. Dies erfordert die

Integration vielfältiger Modelle, um z. B. die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge auf den gesamten Verkehrsfluss und das Verhalten anderer fahrfähiger und laufender Personen zu verstehen. Tatsächlich wird autonomes Fahren unweigerlich eine enge Abstimmung mit der städtischen Infrastruktur erfordern, um viele pragmatische Probleme zu lösen, wie z.B. die Reaktion auf Straßensperrungen und die Priorisierung für Einsatzfahrzeuge. Die Verfasser verstehen daher den Einsatz von Digitalen Zwillingen als eine notwendige Voraussetzung für die Digitalisierung des Mobilitätssektors. **Digitale Zwillinge werden es Städten ermöglichen, die Ursachen von Staus, Umweltverschmutzung und Unfällen besser zu verstehen und die Auswirkungen von Änderungen am Mobilitätssystem vor der Einführung vorherzusagen.** Während des Betriebs bieten Digitale Zwillinge das Potenzial, Probleme wie z.B. Staus in Echtzeit vorherzusagen, bevor sie auftreten, und das Verkehrsmanagement entsprechend anzupassen.

Trotz der erheblichen Vorteile, die der Einsatz von Digitalen Zwillingen im Mobilitätsmanagement in Bezug auf die Bürgerbeteiligung und das zunehmende Vertrauen in Entscheidungen der Stadtverwaltung sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase mit sich bringt, gibt es noch eine Reihe von Herausforderungen. Auf technischer Ebene ist das Zusammenspiel vieler verschiedener Modelle von der Wetterüberwachung und -vorhersage über die Verkehrsflusssimulation bis hin zur Vorhersage des menschlichen Verhaltens eine Herausforderung und erfordert **interdisziplinäre Zusammenarbeit und branchenübergreifende Standards**. Technologien wie das Maschinelle Lernen (Künstliche Intelligenz) können dabei helfen. Entscheidend für die Akzeptanz beim Einsatz solcher Ansätze ist jedoch ein hohes Maß an Vertrauen in die Technologien. Dies erfordert einen rigorosen Ansatz, um die Korrektheit der Ergebnisse zu argumentieren, einschließlich der Transparenz der zugrundeliegenden Entscheidungsprozesse und Modelle, während gleichzeitig die Privatsphäre der Einzelnen bei der Erfassung und Auswertung der Daten gewahrt bleiben muss.





Höhere Lebensqualität & bessere Gesundheit

Der Anwendungsbereich »Lebensqualität und Gesundheit« ist gut geeignet, das große Nutzungspotenzial eines Digitalen Zwillinges aufzuzeigen. Jedoch ist dieser Anwendungsbereich mit einer besonderen Herausforderung konfrontiert: Einerseits impliziert die Nutzung Digitaler Zwillinge die Verknüpfung vieler heterogener Systeme und Datenbestände. Andererseits sind Gesundheitsdaten besonders schützenswerte Daten. Die damit einhergehenden hohen Hürden machen den Anwendungsbereich Gesundheit nicht zum wahrscheinlichen ersten Umsetzungskandidaten für einen Digitalen Zwilling in einer Stadt. Dennoch sind die besonders großen Potenziale des Anwendungsbereichs hervorzuheben, die mittel- bis langfristig realisierbar sein können.

Allgemeine Betrachtung des Anwendungsbereichs

Faktoren, die die Lebensqualität und die Gesundheit von Menschen in der Stadt mindern oder erhöhen, können zwar unübersehbar und bekannt sein, eine tatsächlich positive Veränderung kann sich dennoch extrem schwierig gestalten.

Die Ziele Lebensqualität und Gesundheit werden von aktuellen Vorhaben – implizit – auf unterschiedlichen Ebenen definiert und bearbeitet:

- Auf der individuellen menschlichen Ebene werden die Konzepte Lebensqualität und Gesundheit durch biometrische Daten erhoben, bspw. von Wearables am Handgelenk. Die individuelle Lebensqualität und Gesundheit wird dann letztendlich durch Werte wie das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Stress bei einzelnen Menschen im Stadtalltag definiert.
- Auf der übergeordneten städtischen Ebene werden die individuellen Daten zusammengetragen und mit weiteren Daten des Stadtalltags verknüpft. Die Definition von Lebensqualität und Gesundheit auf dieser höheren Ebene ist dann die Erfassung einer Straße, eines Viertels, einer bestimmten städtischen Infrastruktur (wie einem Ampelsystem, einer U-Bahn oder eines Parks etc.) als mehr oder weniger förderlich für die Lebensqualität und Gesundheit der Stadtbewohner (bspw. aufgrund des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins von biometrisch erfasstem Stress oder anderer sensorischer Daten).

Ausgereifte Digitale Zwillinge könnten somit eine Basis für mehrere lohnenswerte Verbesserungen in diesem Bereich sein.

- Die Erfassung von Lebensqualität und Gesundheit auf feingranularer und Echtzeit-Ebene bietet eine deutlich präzisere und schneller erfassbare Grundlage, um die Lebensqualität



Die Erfassung von Lebensqualität und Gesundheit in Echtzeit bietet eine präzise Grundlage, um die Lebensqualität von Menschen in der Stadt positiv zu beeinflussen.«

von Menschen in der Stadt positiv zu beeinflussen. Wenn sich die gemessene Lebensqualität in einer bestimmten U-Bahn-Linie oder an einer wichtigen Straße deutlich und schnell negativ entwickelt, könnte dies wesentlich früher und mit hilfreichen Informationen ausgestattet an die verantwortlichen Stellen gemeldet werden.

- Im Umfang eines ausgereiften Digitalen Zwillinges ist aber auch die humanfokussierte Analyse von möglichen Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensqualität im Digitalen Zwilling – vor der eigentlichen kostenintensiven Umsetzung in der »rechten Stadt« – denkbar. Ein Digitaler Zwilling bietet den digitalen Raum, um mehrere mögliche Anpassungsszenarien für die Neugestaltung einer bestimmten U-Bahn-Linie oder von Ampelsystemen auszuprobieren und zu prognostizieren: Welche der Optionen erhöht – neben anderen Parametern wie Kosten und Aufwand – die Lebensqualität der Menschen am deutlichsten?
- Wenn es sich um steuerbare Infrastruktur handelt, die als Stressursache oder wichtiger Stressfaktor erkannt wurde, so ist im Rahmen eines ausgereiften Digitalen Zwillinges die direkte Anpassung von steuerbarer Infrastruktur aufgrund von Veränderungen in der gemessenen Lebensqualität und Gesundheit der Menschen in der Stadt denkbar. Wenn in einer U-Bahn-Linie beispielsweise vermehrt positive Werte für Lebensqualität erfasst werden, kann untersucht werden, welche Eigenschaften dieser steuerbaren Infrastruktur auch positive Auswirkungen auf andere Teile der Infrastruktur haben können.

Aber wie sehen solche visionären Ziele in konkreten Vorhaben aktuell aus und wo stehen die städtischen internationalen Vorreiter zurzeit in Bezug auf die Entwicklung von Softwarelösungen für bessere Lebensqualität und Gesundheit?

Aktueller Status quo

Zwar gibt es aktuell noch keine ausgereiften Anwendungen für Digitale Zwillinge im Bereich »Lebensqualität und Gesundheit«, aber eine Reihe von Projekten macht erste Realisierungsvorhaben möglich und legt die Grundlagen für spätere Erweiterungen und Ausreifungen.

Realisierungsvorhaben an der Erkennung von »Stress-Hotspots«

Stress gilt allgemein als ein wichtiger negativer Einfluss auf die menschliche Gesundheit und Lebensqualität. In einem Forschungsprojekt von US-amerikanischen und südkoreanischen Universitäten wurden 2020 mithilfe von tragbaren Sensoren (»Wearables«) die »Stress-Hotspots« von Senioren in ihrem städtischen Alltag erfasst. **Stress-Hotspots waren dabei Orte, an denen zu bestimmten Zeiten besonders stressverursachende Interaktionen stattfanden.**

Im Laufe von zwei Wochen wurde bei 30 Teilnehmenden der biometrische Stresswert gemessen und mit anderen Datenquellen verknüpft, um so eine Karte der räumlichen und zeitlichen negativen Lebensqualität zu erfassen, zum Beispiel ein bestimmtes Ampelsystem an einer Straße. Auf Grundlage solcher Messung könnten Änderungen an der städtischen Infrastruktur durchgeführt werden.

Zukünftige (mögliche) Erweiterungen

Basierend auf dem vorgestellten Ansatz von Stress-Hotspots sind Verknüpfungen mit anderen Vorhaben denkbar, die insgesamt in Richtung eines ausgereiften Digitalen Zwillinges deuten.

Ein »humanfokussiertes« Design mit dem Anspruch, körperlich benachteiligten Stadtbewohnern breiten Zugang zu ermöglichen, könnte auf Basis von Analyseerkenntnissen eines Stress-Hotspots das Design der physischen Stadt positiv beeinflussen. Entsprechende Design-Frameworks für universales Design in smarten Städten existieren und bieten sich für eine Verknüpfung an.

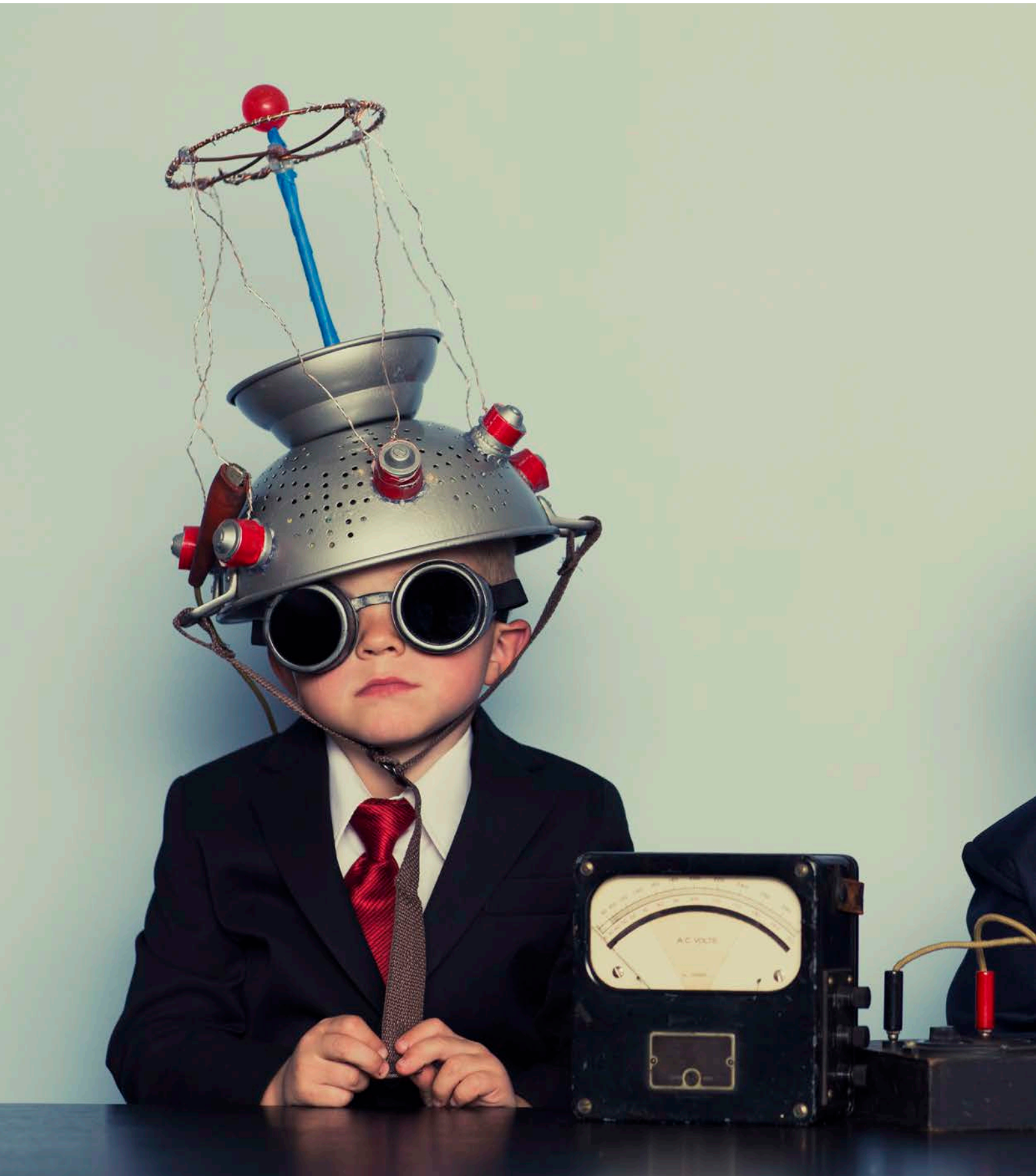
Über die erste Erfassung von Stress-Hotspots hinaus sind regelmäßige Durchläufe durch Städte vorstellbar, um bestehende und neue Hotspots zu prüfen. Um dies in hoher zeitlicher Frequenz und auch seitens der digitalen Repräsentation im Zwilling zu ermöglichen, bietet sich die Verknüpfung mit einem »simulierten kognitiven Abbild einer ortsansässigen Person« an. Diese simulierten Personen laufen in der digitalen Stadt alle denkbaren Wege ab und erkennen simulierte kognitive Überlastungen (Stress) bei einer Person.

In Anwendungsszenarien, die die Messung von individueller Lebensqualität und Gesundheit mit biometrischen Daten vorsehen, gelten in Deutschland deutliche Einschränkungen, die solche Szenarien aktuell nur schwer vorstellbar erscheinen lassen. Wenn solche Szenarien aber fortwährend als unumgänglich und besonders vorteilhaft bewertet werden, müssen natürlich die besonderen Anforderungen an den Schutz von biometrischen Daten gewahrt werden. Entsprechende IT-Anforderungen werden in noch zu verbreitenden Standards wie ISO 11073 X73 festgehalten.

Insgesamt zeigt sich ein Bild von lohnenswerten Vorhaben, die in ihrer Verknüpfung und Erweiterung Wege aufzeigen, wie durch Digitale Zwillinge die Lebensqualität und Gesundheit von Stadtbewohnern positiv beeinflusst werden kann. **Gerade angesichts der großen Kosten, die heutige und zukünftige Gesundheitssysteme zu stemmen haben, ergibt sich hier ein ungeheures Potenzial, um gesundheitsschädliche städtische Umgebungen fortlaufend zu verbessern und positiv zu gestalten.**









Herausforderungen

Komplexität in der Smart City & Umsetzung eines Digitalen Zwillings	28
Ausblick auf ethische Aspekte	31

Im Verlauf dieser Publikation wurde häufig auf den Unterschied zwischen aktuellen Erwartungen an Digitale Zwillinge im städtischen Kontext und den besonders großen – aktuell noch nicht gelösten – Herausforderungen verwiesen. Zwischen dem heutigen Stand der Entwicklung städtischer Digitaler Zwillinge und einem ausgereiften Digitalen Zwilling (siehe Reifegradmodell) stehen große und komplexe technische und organisationale Hürden.

Komplexität in der Smart City & Umsetzung eines Digitalen Zwillings

Smart Cities bieten ein enormes Potenzial für die Verbesserung der Lebensqualität in Städten, während sie gleichzeitig Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle und Wege zur Beschleunigung des wirtschaftlichen Wachstums bieten.

Das Ausschöpfen dieses Potenzials erfordert die Digitalisierung und Interaktion vieler, derzeit eigenständiger und oft manuell entwickelter oder historisch gewachsener Systeme, die sich aus vielen technologischen und sozialen Bausteinen zusammensetzen.

Dies wiederum wird zu einer zunehmenden Vernetzung und Komplexität vieler Teile unserer kritischen Infrastruktur führen, deren Ausfall gravierende Auswirkungen für bürgerliche Personen und Umwelt haben könnte, z.B. einen daraus resultierenden Vertrauensverlust der Öffentlichkeit gegenüber dem Konzept Smart City. Die Beherrschung der Komplexität der »Systeme von Systemen« einer Smart City, also **die Gestaltung des »Digitalen Smart City Ökosystems« wird daher in den kommenden Jahren eine zentrale Herausforderung** sein.

Gleichzeitig sehen wir, dass durch die Entwicklung von Digitalen Zwillingen vieles möglich wird, was man heute noch nicht umsetzen kann. Dadurch wird das Gesamtsystem Smart City noch komplexer und grundsätzlich das Risiko eines Verlust von kritischen städtischen Diensten erhöht. Andererseits könnten Digitale Zwillinge aber an vielen Stellen dazu beitragen, bereits vorhandene Risiken stärker beherrschen zu können. Es ist also ratsam, sich im Kontext der Umsetzung intensiv mit dem Thema Risikomanagement zu befassen und mögliche Auswirkungen frühzeitig zu beleuchten.



Zunächst soll jedoch geklärt werden, was wir unter Komplexität im Allgemeinen und im Kontext Smart City im Besonderen verstehen.

Systeme werden oft als komplex beschrieben, wenn aufgrund der Wechselwirkungen ihrer Komponenten unvorhergesehene und sich selbst bildende («emergente») Verhaltensweisen auftreten können. Merkmale, die zur Systemkomplexität beitragen, können sein:

- **Durchlässige Systemgrenzen:** Die Grenze zwischen dem System und der nicht zum System gehörigen Umgebung kann von der Sichtweise derjenigen abhängen, die das System analysieren. Beispiel: der Unterschied zwischen a) einer planenden Person, die die Interaktionen zwischen vielen Fahrzeugen, anderen Verkehrsteilnehmenden und städtischen Diensten berücksichtigt und b) einer ingenieurmäßig tätigen Person, die eine automatisierte Fahrfunktion für ein einzelnes Fahrzeug betrachtet. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Systemen ist es nicht immer offensichtlich, wo ein System endet und seine Umgebung beginnt. Diese Grenze kann sich im Laufe der Zeit ändern und organisationale und rechtliche Grenzen überschreiten.
- **Nichtlineares Verhalten und Instabilität:** Das System kann sich auf eine unvorhersehbare und unerklärliche Weise verhalten. Kleine Änderungen der Bedingungen oder unerwartete Kombinationen von Faktoren können das System in einen instabilen oder gefährlichen Zustand versetzen. Das scheinbar spontane Auftreten eines Staus und Stop-and-Go-Verkehrs in der Stadt sind Beispiele für ein solches Verhalten in Verkehrssystemen.
- **Selbstorganisation und Ad-hoc-Systeme:** Systeme selbst können spontan entstehen oder sich weiterentwickeln. Ein Beispiel hierfür wäre die Entstehung von neuen Diensten, die bereits vorhandene Informationen für bisher nicht vorhergesehene Zwecke vernetzen. Dies kann eine wünschenswerte Konsequenz sein, zum Beispiel im Bereich der »Ökonomie der Dinge«, wo autonome Agenten interagieren sollen, um ad-hoc neue Dienste (Systeme) zu schaffen. Die Folgen können aber auch negativ sein und zu unkontrolliertem Verhalten mit unklarer Governance oder Sicherheitskonzepten führen. Ein Beispiel hierfür könnte die Verwendung von Daten über freie Parkplätze, die über eine App vermittelt werden, sein. Dies könnte die Konsequenz haben, dass das Verkehrsaufkommen in Seitenstraßen (und die damit verbundenen Auswirkungen für Umwelt und Verkehrssicherheit) stark zunimmt.

entstehen können. Ein Digitaler Zwilling ermöglicht es, in Echtzeit entstehende Risiken rechtzeitig zu erkennen (noch besser vorauszusagen) und durch physikalische Interventionen zu minimieren. Den entsprechenden Einsatz eines Digitalen Zwillings konzipieren wir auf verschiedenen Organisationsebenen.

- **Governance-Ebene:** Digitale Zwillinge können verwendet werden, um politische Entscheidungsträger, einschließlich Gesetzgeber und städtische Behörden, über die Auswirkungen kritischer Entscheidungen wie die Einführung automatisierter Fahrzeuge oder die Entwicklung von Notfallmaßnahmen zu informieren. Digitale Zwillinge können auch verwendet werden, um die Erfüllung regulatorischer Anforderungen zu bewerten und können zu einer informierten, datengesteuerten Form der Governance zu führen.
- **Management- und Betriebsebene:** Digitale Zwillinge können genutzt werden, um Smart Cities so zu gestalten, dass sie resilient gegenüber Veränderungen in der Umgebung und unvorhergesehenem sowie emergentem Verhalten sind. Dies sollte auch die Fähigkeit beinhalten, Verhalten zu beobachten, das darauf hinweist, dass das System instabil werden könnte, und somit proaktiv zu reagieren, um unerwünschte Systemzustände zu vermeiden.
- **Interaktionsebene:** Digitale Zwillinge können verwendet werden, um Interaktionen zu managen zwischen a) technischen Smart-City-Systemen sowie b) den technischen Systemen und Nutzenden. Dies erfordert eine Perspektive der Ergonomie und des Systemdenkens mit dem Menschen im Vordergrund und nicht nur technologische Lösungen zur Modellierung des emergenten Systemverhaltens.



Wir sehen den Einsatz von Digitalen Zwillingen als **ein wesentliches Mittel zur Beherrschung von Risiken**, die aus der zuvor dargestellten Komplexität einer Smart City



Ausblick auf ethische Aspekte

Der Einsatz von Digitalen Zwillingen im Kontext von Smart Cities wirft eine Reihe an ethischen Fragestellungen auf. Den Verfassenden ist es wichtig, dass solche Fragen nicht nur von Personen mit technologischer Expertise gelöst werden sollten, sondern im Rahmen eines informierten Dialogs zwischen Vertretungen verschiedener gesellschaftlicher Perspektiven.

Im Folgenden wird eine sehr verkürzte Auswahl an möglichen Auslösern für einen solchen Ethik-Dialog im Kontext städtischer Digitaler Zwillinge dargestellt. Diese Auswahl soll lediglich die Richtung für mögliche ethische Aspekte aufzeigen und kommt ohne den Anspruch einer annähernd abschließenden oder – der großen Relevanz des Themas erschöpfend gerecht werdenden – Darstellung daher.

Viele der ethischen Fragen, die sich mit einem städtischen Digitalen Zwilling ergeben, lassen sich mit den folgenden Schwerpunkten in Verbindung bringen:

- **Big Data vs. Privatsphäre:** Die groß angelegte Sammlung von Daten, die sich auf das Verhalten von bürgerlichen Personen beziehen, und die Möglichkeit, aus diesen Daten Informationen (z.B. Verhaltensmuster) abzuleiten, wirft Fragen der Privatsphäre und

der Handlungsfähigkeit auf (Fähigkeit der bürgerlichen Person zu entscheiden, welche Daten über sie gesammelt werden und wie sie verwendet werden). Darüber hinaus gelten diese Fragen nicht nur für Einzelpersonen, sondern auch für gesellschaftliche Gruppen, bei denen darauf geachtet werden muss, dass eine explizite oder implizite Diskriminierung auf der Grundlage potenziell verzerrter Daten vermieden wird (z.B. Verzerrung zugunsten derjenigen in der Gesellschaft, die sich vernetzte IoT-Geräte leisten können).

- **Künstliche Intelligenz und Transparenz, Erklärbarkeit von Entscheidungen:** Digitale Zwillinge haben das Potenzial, bei der Steuerung kritischer Prozesse – innerhalb von Smart Cities – die Entscheidungsfindung durch menschliche Akteure entweder vollständig zu ersetzen oder menschliche Anteile deutlich reduzieren zu können. Dazu gehören Entscheidungen, die bisher menschliche Interpretation, ethisches Urteilsvermögen und gesetzeskonformes Verhalten erfordert hätten. Dies erschwert die Aufgabe, die beabsichtigte Funktionalität der Systeme zu spezifizieren, erheblich und kann zu einer »moralischen Verantwortungslücke« führen.

Aus diesen Herausforderungen ergibt sich die Notwendigkeit einer umfassenden Auseinandersetzung mit dem Thema »Vertrauenswürdigkeit« von Digitalen Zwillingen, wenn diese in Umfang und Verhalten zunehmen.

Vertrauenswürdigkeit kann auf viele Arten ausgedrückt werden:

- Vorrang menschlichen Handelns und menschliche Aufsicht
- Technische Robustheit und Sicherheit
- Datenschutz und Datenqualitätsmanagement
- Transparenz
- Vielfalt, Nichtdiskriminierung und Fairness
- Gesellschaftliches und ökologisches Wohlergehen
- Rechenschaftspflicht.

Es besteht ein großer Bedarf an interdisziplinärem Dialog und ethisch informierten Ansätzen in der Technik, um diese Eigenschaften in technische Anforderungen an das System zu übersetzen. Dazu gehört auch, eine gesellschaftliche Diskussion über die Einführung solcher Systeme zu ermöglichen, die auf einem faktenbasierten Verständnis der Potenziale und Einschränkungen der Technologien beruht.

Gleichzeitig kann der Einsatz von Digitalen Zwillingen aber auch zum besseren Verständnis und zur Visualisierung komplexer Prozesse und deren Auswirkungen genutzt werden, um die bürgerschaftliche Beteiligung zu fördern und sicherzustellen, dass Personen mit Expertise aus mehreren unterschiedlichen Disziplinen interagieren können, um einen Konsens über möglicherweise mehrdeutige ethische Entscheidungen der Systeme zu erzielen.



Fazit

10 Thesen zum Digitalen Zwilling in der Smart City 35

Fazit

Der Digitale Zwilling bietet schon heute eine vielversprechende Grundlage für zukünftige Entwicklungsstufen einer intelligent vernetzten Stadt. Die Verfassenden sehen neben der Industrie 4.0 die Smart City als einen der spannendsten Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings. Bisherige Pilotprojekte haben häufig einen beteiligungsorientierten Charakter und beziehen die Bürgerschaft in die Umsetzung mit ein. Dieser partizipative Anspruch eröffnet die Möglichkeit, dass in Zukunft verwirklichte Digitale Zwillinge sowohl die Lebensqualität von Menschen in der Stadt als auch die Akzeptanz der Technologie erhöhen werden.

Der Digitale Zwilling bietet großes Potenzial für die Zukunft, wie beispielsweise eine umfassende Repräsentation eines großen, komplexen Gesamtsystems (etwa einer ganzen Stadt) in allen Facetten. Es gilt allerdings auch einige Einschränkungen und Herausforderungen zu beachten. Das in diesem Paper aufgezeigte Reifegradmodell soll helfen, zu verstehen, dass die erfolgreiche Realisierung eines Digitalen Zwillings in einer Stadt einen hohen grundsätzlichen Reifegrad bei der Digitalisierung erfordert. Es ist daher notwendig, vor der Umsetzung des Digitalen Zwillings die entsprechenden Voraussetzungen zu schaffen. Das betrifft insbesondere Grundlagen in den Bereichen Management, Technologie und Forschung sowie der Möglichkeiten für Menschen in der Stadt, einen Digitalen Zwilling zu nutzen. Es ist daher sinnvoll, neben der Berücksichtigung des

Digitalen Zwillings **den Reifegrad der Digitalisierung insgesamt zu erhöhen.**

Weiterhin erfordert die Umsetzung neben dem Zusammenspiel vieler (oft schnelllebigere) Technologien die Koordination verschiedenster handelnder Personen sowie das Zusammenführen von unterschiedlichen Datenquellen (Silos). Gelingen diese Voraussetzungen nicht, wird der Digitale Zwilling hinter den heutigen hohen Erwartungen zurückbleiben. Daher sollten die Komplexität des Konzepts und die daraus resultierenden Kosten entsprechender Projekte nicht unterschätzt und stets gegenüber dem tatsächlichen Nutzen abgewogen werden.

Aus der bundespolitischen Perspektive einer proaktiven und anwendungsorientierten Forschungsförderung von Zukunftstechnologien ist es dringend empfehlenswert, konkrete Anwendungsfälle zu fördern, die den praktischen Nutzen für die Stadtverwaltung, aber insbesondere auch für die Zivilgesellschaft aufzeigen. Dabei sollte nicht jede Kommune eine Individualentwicklung anstreben, sondern es sollte vielmehr zu Austausch und Kooperation zwischen Städten kommen. Eine wichtiger Diskussionspunkt, so zeigt es auch die aktuelle Debatte um die Rolle von GAIA-X im Zusammenhang mit kommunalen Datenplattformen, ist, dass es Softwareprodukte bzw. Plattformen geben sollte, die übergreifend entwickelt und dann entsprechend mandantenfähig eingesetzt werden können.

Konkrete Anwendungsfälle im Kontext Smart City sollten gefördert werden mit dem Ziel, den praktischen Nutzen eines Digitalen Zwillings in einer fortgeschrittenen Ausbaustufe zu demonstrieren.

Dazu gehört auch, den hohen Bedarf an qualifiziertem IT-Personal zur Einrichtung eines Digitalen Zwilling einzuberechnen. Zusätzlich wird der Aufbau eines Digitalen Zwilling aktuell noch durch den Mangel an entsprechenden Standards und Best Practices erschwert. Dies stellt eine ernstzunehmende Einstiegsbarriere in die neue Technologie dar, die ebenfalls in Betracht gezogen werden sollte. Zuletzt bestehen, besonders im Hinblick auf Menschen und deren Umfeld, auch noch ethische Fragen bzgl. gesammelter Daten, daraus generierter Erkenntnisse und resultierender Entscheidungen bzw. Handlungen.

Für eine erfolgreiche Umsetzung ist es darüber hinaus hilfreich, als Handlungsgrundlage eine spezialisierte Definition »Digitaler Zwilling für Smart Cities« zu entwickeln. Dazu gehört auch

die Erarbeitung einer Referenzarchitektur für die Nutzung der Technologie aus Sicht einer Stadt.

Schlussendlich ist jedoch die grundlegende Frage zu klären, welche Rolle die Stadt bei der Umsetzung des Digitalen Zwilling einnehmen möchte und welche individuelle Motivation damit verbunden ist. Will man sich durch die Umsetzung gegenüber anderen Städten differenzieren und den Digitalen Zwilling als Standortfaktor nutzen? Sollte sich überhaupt jede Stadt den vollen Digitalen Zwilling leisten? Geht es bei dem Digitalen Zwilling für die Stadt insbesondere um wirtschaftliche Aspekte (z.B. Effizienz, Einsparpotenziale, Geschwindigkeit) oder stehen Aspekte wie Innovation und soziales Miteinander im Vordergrund?

10 Thesen zum Digitalen Zwilling in der Smart City

1. Aufgrund seines Potenzials für die Smart City sollte der Digitale Zwilling gemeinsam mit einem Anspruch an grundsätzlichen Fortschritt in der Digitalisierung berücksichtigt werden.
2. Die Umsetzung eines Digitalen Zwilling erfordert die Beherrschung einer Vielzahl verschiedener Technologien und das Zusammenführen unterschiedlichster Datenquellen.
3. Die Umsetzung eines Digitalen Zwilling erfordert die Koordination einer Vielzahl von handelnden Personen im regionalen Ökosystem Stadt.
4. Die Schaffung von Standards ist notwendig, um eine höhere Interoperabilität von Digitalen Zwillingen zu ermöglichen.
5. Konkrete Anwendungsfälle im Kontext Smart City sollten mit dem Ziel gefördert werden, den praktischen Nutzen eines Digitalen Zwilling in einer fortgeschrittenen Ausbaustufe zu demonstrieren, sobald Städte die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung erfüllen.
6. Kooperationen zwischen Städten und auch Unternehmen bei der Entwicklung von Digitalen Zwillingen sollten eine Voraussetzung sein.
7. Interdisziplinäre Antworten auf ethische Fragestellungen im Kontext von automatisierten Entscheidungsprozessen sind notwendig.
8. Die Berücksichtigung des Bedarfs an qualifiziertem Personal seitens der Stadtverwaltung zur Umsetzung eines Digitalen Zwilling sollte Teil des Prozesses sein.
9. Zur nachhaltigen Umsetzung wird eine unabhängig erstellte Referenzarchitektur »Digitaler Zwilling für Smart Cities« benötigt.
10. Die konkrete Rolle der Stadt bei der Umsetzung des Konzeptes »Digitaler Zwilling« erfordert Leitplanken und Empfehlungen aus Politik und Forschung.

Referenzen

- Ainhirn F.: Environmental Parameter Modelling for Thermal Rating Calculations of Power Cables in Urban Areas using Machine Learning and Big Data, IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2020.
- Al-Ali A.R., Gupta R., Batool T.Z., Landolsi T., Aloul F., Nabulsi A.A.: Digital twin conceptual model within the context of internet of things, Future Internet, 2020.
- Allam Z., Jones D.S. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies, Land Use Policy, 2021.
- Augustine P.: The industry use cases for the Digital Twin idea, Advances in Computers, 2020.
- Austin M., Delgoshaei P., Coelho M., Heidarinejad M.: Architecting Smart City Digital Twins: Combined Semantic Model and Machine Learning Approach, Journal of Management in Engineering, 2020.
- BBSR: Smart City Charta - Digitale Transformation in den Kommunen nachhaltig gestalten, 2017.
- Beil C., Ruhdorfer R., Coduro T., Kolbe T.H.: Detailed Streetspace Modelling for Multiple Applications: Discussions on the Proposed CityGML 3.0 Transportation Model, ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020.
- Breunig M., Bradley P.E., Jahn M., Kuper P., Mazroob N., Rösch N., Al-Doori M., Stefanakis E., Jadidi M.: Geospatial data management research: Progress and future direction, ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020.
- Campolo C., Genovese G., Molinaro A., Pizzimenti B.: Digital Twins at the Edge to Track Mobility for MaaS Applications, Proceedings of the 2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, DS-RT, 2020.
- Castelli G., Tognola G., Campana E.F., Cesta A., Diez M., Padula M., Ravazzani P., Rinaldi G., Savazzi S., Spagnuolo M., Strambini L.: Urban Intelligence: A Modular, Fully Integrated, and Evolving Model for Cities Digital Twinning, HONET-ICT 2019 - IEEE 16th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life using ICT, IoT and AI, 2019.
- Conejos Fuertes P., Martínez Alzamora F., Hervás Carot M., Alonso Campos J.C.: Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks, Urban Water Journal, 2020.
- Dembski F., Ssner U.W., Yamu C.: Digital twin, virtual reality and space syntax: Civic engagement and decision support for smart, sustainable cities, 12th International Space Syntax Symposium, SSS 2019.
- Dembski F., Wössner U., Letzgs M., Ruddat M., Yamu C.: Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of herrenberg, germany, Sustainability (Switzerland), 2020.
- Dou S.Q., Zhang H.H., Zhao Y.Q., Wang A.M., Xiong Y.T., Zuo J.M.: Research on Construction of Spatio-Temporal Data Visualization Platform for GIS and BIM Fusion, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2020.
- Du J., Zhu Q., Shi Y., Wang Q., Lin Y., Zhao D.: Cognition Digital Twins for Personalized Information Systems of Smart Cities: Proof of Concept, Journal of Management in Engineering, 2020.
- Fan C., Jiang Y., Mostafavi A.: Social Sensing in Disaster City Digital Twin: Integrated Textual-Visual-Geo Framework for Situational Awareness during Built Environment Disruptions, Journal of Management in Engineering, 2020.
- Fazio M., Ranjan R., Longo A., Zappatore M.: 1st workshop on cybe-physical social systems (CPSS) 2019, ACM International Conference Proceeding Series, 2019.
- Ford D.N., Wolf C.M.: Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management, Journal of Management in Engineering, 2020.
- Francisco A., Mohammadi N., Taylor J.E.: Smart City Digital Twin-Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking, Journal of Management in Engineering, 2020.
- Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.: Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, IEEE Access, 2020.
- Glaessgen, Edward, and David Stargel: The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012.
- Grigoropoulos N., Lalis S.: Simulation and Digital Twin Support

for Managed Drone Applications, Proceedings of the 2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, DS-RT, 2020.

Han T., Zhao J., Li W.: Smart-guided pedestrian emergency evacuation in slender-shape infrastructure with digital twin simulations, Sustainability (Switzerland), 2020.

<https://www.prnewswire.com/news-releases/new-urban-use-cases-drive-over-500-cities-to-adopt-digital-twins-by-2025-301200827.html>, 01.09.2021.

<https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digitale-zwillinge-it-infrastruktur/>, 01.09.2021.

<https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digitale-zwillinge-fuer-die-landwirtschaft/>, 01.09.2021.

<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/ethics-guidelines-trustworthy-ai>), 01.09.2021.

<https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digitale-zwillinge-it-infrastruktur/>, 01.09.2021.

<https://www.eclipse.org/sumo/>, 01.09.2021.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0004370219301109>

Joao D.V., Lodetti P.Z., Martins M.A.I., Almeida J.F.B.: Virtual and Augmented Reality Applied in Power Electric Utilities for Human Interface Improvement-A Study Case for Best Practices: 2020 IEEE Technology and Engineering Management Conference, TEM-SCON 2020.

Kim J., Kim H., Ham Y.: Mapping Local Vulnerabilities into a 3D City Model through Social Sensing and the CAVE System toward Digital Twin City, Computing in Civil Engineering 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, 2019.

Kim S.-S., Lee W.-R., Go J.-H.: A Study on Utilization of Spatial Information in Heterogeneous System Based on Apache NiFi, ICTC 2019 - 10th International Conference on ICT Convergence: ICT Convergence Leading the Autonomous Future, 2019.

Klebanov B., Antropov T., Zvereva O.: Hybrid Automaton Implementation for Intelligent Agents' Behavior Modelling, International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT, 2019.

Klebanov B., Nemtinov A., Zvereva O.: Simulation as an effective instrument for strategic planning and transformation of smart cities, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018.

Kumar S.A.P., Madhumathi R., Chelliah P.R., Tao L., Wang S. A novel digital twin-centric approach for driver intention prediction and traffic congestion avoidance, Journal of Reliable Intelligent Environments, 2018.

Laamarti F., Badawi H.F., Ding Y., Arafsha F., Hafidh B., Saddik A.E.: An ISO/IEEE 11073 Standardized Digital Twin Framework for Health and Well-Being in Smart Cities, IEEE Access, 2020.

Lai G., Tong X., Zhang Y., Ding L., Sui Y., Lei Y., Zhang Y.: A spatial multi-scale integer coding method and its application to three-dimensional model organization, International Journal of Digital Earth, 2020.

Lee G., S.m.asce, Choi B., Ahn C.R., A.m.asce, Lee S., M.asce: Wearable Biosensor and Hotspot Analysis-Based Framework to Detect Stress Hotspots for Advancing Elderly's Mobility, Journal of Management in Engineering, 2020.

Lieberman J., Leidner A., Percivall G., Rösndorf C.: Using big data analytics and IoT principles to keep an eye on underground infrastructure, Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data , 2017.

Lin Y.-C., Prof., Cheung W.-F.: Developing WSN/BIM-Based Environmental Monitoring Management System for Parking Garages in Smart Cities, Journal of Management in Engineering, 2020.

Liu Z., Zhang A., Wang W., A framework for an indoor safety management system based on digital twin, Sensors (Switzerland), 2020.

Marai O.E., Taleb T., Song J.: Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization, IEEE Network, 2020.

Maruyoshi M., Kawatani M., Mori K., Digital twin computing of things opens up a new society, NTT Technical Review, 2020.

Mayer H.: Digitalization of legacy building data preparation of printed building plans for the BIM process, SMARTGREENS 2018 - Proceedings of the 7th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, 2018.

McLachlan D.J., Isherwood J., Peile M.: Field development: Agile value optimisation, Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2019.

- Mihokovic V., Zalovic L., Zalovic I.V.: Establishing the utility charges spatial database using digital twin technology, 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, MIPRO 2020 - Proceedings, 2020.
- Minerva R., Lee G.M., Crespi N.: Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models, Proceedings of the IEEE, 2020.
- Mohammadi N., Taylor J.E.: Smart city digital twins, 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings, 2017.
- Newbold A.: Transforming a functional airport to a smart, digital one, Journal of Airport Management, 2020.
- Nochta T., Wan L., Schooling J.M., Parlikad A.K.: A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins, Journal of Urban Technology, 2020.
- Nys G.-A., Billen R., Poux F.: Automatic 3D Buildings Compact Reconstruction from Lidar Point Clouds, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2020.
- O'Dwyer E., Pan I., Acha S., Gibbons S., Shah N.: Modelling and evaluation of multi-vector energy networks in smart cities, International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making, 2019.
- O'Dwyer E., Pan I., Charlesworth R., Butler S., Shah N.: Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems, Sustainable Cities and Society, 2020.
- Olszewski R., Cegiełka M., Wesolowski J.: The Concept and Development of a Serious Game „Alter Eco” as Part of Creating a Digital Twin of a Smart City, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2019.
- Park S., Lee S., Park S., Park S.: AI-based physical and virtual platform with 5-layered architecture for sustainable smart energy city development, Sustainability (Switzerland), 2019.
- Park S., Park S.H., Park L.W., Park S., Lee S., Lee T., Lee S.H., Jang H., Kim S.M., Chang H., Park S.: Design and implementation of a Smart IoT based building and town disaster management system in Smart City Infrastructure, Applied Sciences (Switzerland), 2018.
- Petrova-Antonova D., Ilieva S.: Digital twin modeling of smart cities, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021.
- Petrova-Antonova D., Ilieva S.: Methodological framework for digital transition and performance assessment of smart cities, 2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech, 2019.
- Radenkovic B., Despotovic-Zrasic M., Bogdanovic Z., Barac D., Labus A., Naumovic T.: A distributed IoT system for modelling dynamics in smart environments, Proceedings - 2020 International Conference Engineering Technologies and Computer Science, EnT 2020.
- Ruohomaki T., Airaksinen E., Huuska P., Kesaniemi O., Martikka M., Suomisto J.: Smart City Platform Enabling Digital Twin, 9th International Conference on Intelligent Systems 2018: Theory, Research and Innovation in Applications, IS 2018 - Proceedings.
- Sai Y., Zhang T., Huang X., Ding C.: Analysis of digital twins and application value of power engineering based on BIM, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020.
- Seto T., Sekimoto Y., Asahi K., Endo T.: Constructing a digital city on a web-3D platform: Simultaneous and consistent generation of metadata and tile data from a multi-source raw dataset, Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Advances in Resilient and Intelligent Cities, ARIC 2020.
- Shirowzhan S., Tan W., Sepasgozar S.M.E.: Digital twin and CyberGIS for improving connectivity and measuring the impact of infrastructure construction planning in smart cities, ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020.
- Soe R.-M.: FINEST Twins: Platform for cross-border smart city solutions, ACM International Conference Proceeding Series, 2017.
- Soe R.-M.: Smart twin cities via urban operating system, ACM International Conference Proceeding Series 2017.
- Song S.-J., Jang Y.-G.: Construction of digital twin geotechnical resistance model for liquefaction risk evaluation, ACM International Conference Proceeding Series, 2018.
- Susila N., Sruthi A., Usha S.: Impact of cloud security in digital twin, Advances in Computers, 2020.
- Svelec D., Bjelcic N., Blazekovic M.: Smart cities as an opportunity and challenge for people with disabilities, 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, MIPRO 2020..
- Szalay Z., Szalai M., Toth B., Tettamanti T., Tihanyi V.: Proof of concept for Scenario-in-the-Loop (SciL) testing for autonomous vehicle technology, 8th IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2019..

- Taymanov R., Sapozhnikova K.: Development of measurement science in the context of the fourth industrial revolution, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020.
- Thejaswini R.S.S., Rajaraajeswari S.: A real-time traffic congestion-avoidance framework for smarter cities, *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- Villanueva F.J., Acena O., Dorado J., Cantarero R., Fernandez Bermejo J., Rubio A.: On building support of digital twin concept for smart spaces, *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems, ICHMS 2020*.
- Vitaliev V.: Our survey, *Engineering and Technology*, 2017.
- Volkov S.: City services management methodology based on socio-cyber-physical approach, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2019.
- Wan L., Nochta T., Schooling J.M.: Developing a city-level digital twin - Propositions and a case study, *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making*, 2019.
- Xue F., Lu W., Chen Z., Webster C.J.: From LiDAR point cloud towards digital twin city: Clustering city objects based on Gestalt principles, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020.
- Yun Y., Lee M.: Smart City 4.0 from the perspective of open innovation, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2019.
- Zaballos A., Briones A., Massa A., Centelles P., Caballero V.: A smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring, *Sustainability (Switzerland)*, 2020.
- Zhang H., Wei J., Jiao J., Gao Y.: Comprehensive information management analysis of construction project based on BIM, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020.
- Zhou X., Han X., Wang W.: Thoughts of Artificial Intelligence Enhanced Smart Community Management, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020.



Impressum

Verfassende:

Pascal Guckenbiehl, Steffen Hess, Moritz Mumme, Gerald Swarat, Sophie Vogt-Hohenlinde
Fraunhofer IESE

Simon Burton, Karsten Roscher
Fraunhofer IKS

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e. V.
Hansastraße 27 c
80686 München**

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V.,
München 2021



Kontakt

Steffen Hess
Abteilungsleiter Digital Society Ecosystems
Tel. +49 631 6800 2275
steffen.hess@iese.fraunhofer.de

Fraunhofer IESE
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
www.iese.fraunhofer.de