

Digitale Zwillinge in deutschen Städten: Vergleichende Analyse von Leistungs- indikatoren und messbaren Auswirkungen

Research Brief¹

Andreas Marx, Thea Seidel

Der Einsatz von Urbanen Digitalen Zwillingen (UDT) als digitales Planungsinstrument zeigt vielversprechende Ansätze in der Stadtentwicklung und kann so einen Beitrag zur Beschleunigung von urbanen Transformationsprozesse leisten (Weil 2023, Deng 2021, Hämäläinen 2021). Ihr Einsatz verspricht, die Stadtplanung und -verwaltung zu revolutionieren, indem die Prognosefähigkeit erhöht, das Infrastrukturmanagement verbessert und die Bürgerbeteiligung gefördert werden (Fraunhofer IESE 2024). Damit ermöglicht sie Stadtplaner*innen und politischen Entscheidungsträger*innen, Ergebnisse vorherzusagen, Strategien zu bewerten und komplexe Herausforderungen anzugehen. Es lassen sich messbare Zusammenhänge zwischen dem Einsatz Digitaler Zwillinge und der Verbesserung verschiedener Leistungsindikatoren in der Stadtentwicklung aufzeigen, die im Rahmen dieser Studie² weiter untersucht werden sollen (Shahat 2021, Borrás et. al 2023). Im Zentrum steht dabei die Frage, inwiefern Urban Digital Twins zur Förderung einer intelligenten digitalen Transformation in den Städten beitragen.

Forschungsfokus

Die Analyse konzentriert sich auf die reale Anwendung und die systemischen Auswirkungen von Use Cases Digitaler Zwillinge in 34 deutschen Städten³:



Quelle: eigene Darstellung

1 Dieser Forschungsbeitrag wurde im Rahmen der Urban Digital Twins for a Sustainable Transformation of Cities Conference am 02.04.2025 an der HafenCity Universität vorgestellt.

2 Das Urban Digitainability Lab forscht zu relevanten digitalen Technologien und ihrem Beitrag für eine nachhaltig-digitale Transformation in deutschen Städten und Kommunen.

3 In die Untersuchung wurden laufende Projekte aus folgenden Städten einbezogen: Berlin, Bielefeld, Bochum, Braunschweig, Cottbus, Dresden, Düsseldorf, Forchheim, Halle, Hamburg, Hamm, Hannover, Herne, Hildesheim, Kassel, Kempten, Kiel, Kirchheim b. München, Koblenz, Krefeld, Leipzig, Mainz, Mönchengladbach, Mühlhausen, München, Münster, Osnabrück, Paderborn, Potsdam, Regensburg, Rostock, Stuttgart, Wolfsburg, Wuppertal

Ziel ist es, den Wirkungsbereich von UDT-Anwendungen in Deutschland zu analysieren. Dabei konzentriert sich die Untersuchung auch auf die Bewertung der Übereinstimmung dieser Projekte mit den Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs⁴). Im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs zu UDT stehen dabei besonders folgende Aspekte im Fokus:

Potenziale von UDT

- Optimierte Stadtplanung und Nachhaltigkeit (Xia et al. 2022)
- Echtzeitsimulation und -prognose (Hämäläinen 2021, Halúsková 2023)
- Skalierbare, modulare Systemarchitekturen (Herzog, 2023)
- Stärkeres Engagement der Bürger durch transparente Verwaltung (Mora et al. 2023)
- Inklusive und gerechte städtische Verwaltung (Bradshaw & Kitchin 2022)
- Innovative regionale Zusammenarbeit zur Überwindung infrastruktureller Lücken (Adreani et al. 2024).
- Vorhersagefähigkeiten der nächsten Generation durch generative KI (Xu et al. 2024)

Herausforderungen in der Umsetzung/Nutzung

- Mangel an Standardisierung und Interoperabilität (Kelnberger & Schonowski, 2022)
- Inkonsistente Datenqualität und hoher Rechenaufwand (Halúsková, 2023; Herzog, 2023)
- Finanzielle und infrastrukturelle Einschränkungen (Mukhacheva et al., 2022)
- Datenschutz und ethische Fragen (Nochta et al., 2021; Van Twist et al., 2023)

Forschungshypothesen

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen ergeben sich die folgenden Annahmen für die Analyse:

Hypothese 1

UDTs dienen als effektive Instrumente für die urbane Transformation: z.B. durch den Einsatz als digitales Planungsinstrument für alle Arten von aktuellen Herausforderungen in der Stadtentwicklung. Daneben bieten sie eine genaue Übersicht über komplexe urbane Systeme (z.B. Mobilität, Wohnen, Energie) und tragen so zu einem besseren Verständnis für die Auswirkungen von Stadtplanungsprozessen bei.

Hypothese 2

UDTs fördern transformative Kapazitäten innerhalb lokaler Verwaltungen: Dies umfasst eine Stadtentwicklung im Einklang mit den SDGs auf Grundlage von verbesserten und datengestützten Entscheidungsfindungen. Daneben fördert eine stärkere (Bürger-)Beteiligung und Transparenz die Zusammenarbeit des öffentlichen Sektors mit der Stadtgesellschaft und privaten Akteuren.

Hypothese 3

UDTs führen zu systematischen Verzerrungen der Ergebnisse aufgrund von datengesteuerten Analysen: UDTs stützen sich häufig auf leicht messbare, quantifizierbare Daten und übersehen dabei möglicherweise qualitative Aspekte des städtischen Lebens. Das Risiko einer Verzerrung besteht dann, wenn Datensätze marginalisierte Bevölkerungsgruppen

⁴ <https://sdgs.un.org/goals>

pen oder weniger digitalisierte Gebiete unterrepräsentieren.

Hypothese 4

UDTs können ethische Bedenken aufwerfen und demokratische Werte in Frage stellen:

Besonders die Themen wie Überwachung, algorithmische Steuerung und digitale Ungleichheit werfen ernsthafte ethische Fragen auf. Daneben könnte die „digitale Kluft“ die sozialen Ungleichheiten vertiefen, wenn sie nicht proaktiv angegangen wird. Auch das öffentliche Vertrauen kann erodieren, wenn Transparenz, Partizipation und Datenverwaltung nicht sorgfältig gehandhabt werden.

Vorläufige Erkenntnisse

Die Analyse der 34 Use Cases hat gezeigt, dass sich die meisten UDT-Anwendungen auf die kommunale Handlungsfelder Stadtplanung und Mobilität/Verkehr erstrecken. Diese umfassen somit die Bereiche mit dem größten kommunalen Handlungsdruck in wachsenden Städten. Weitere Handlungsfelder die für UDT-Anwendungen aktuell genutzt werden sind u.a. Klimaanpassung sowie Inklusion und Partizipation. Dies deutet darauf hin, dass UDTs einen breiten Anwendungsbereich haben, um mehrdimensionale städtische Herausforderungen anzugehen. Allerdings befinden sich viele Projekte noch in der Anfangsphase (Umsetzung/Test), was die Möglichkeit einer Bewertung der langfristigen Auswirkungen aktuell noch einschränkt.

In Bezug auf die Einschätzung der untersuchten Projekte für die Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) lässt sich festhalten, dass die UDT-Anwendungen insbesondere für die SDGs 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden), 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur) und 13 (Klimapolitik) ein Potenzial darstellen. Sie versetzen Städte in die Lage, ihre Infrastruktur, Ressourcen und städtischen Systeme in Echtzeit zu überwachen und zu optimieren (SDG 11), sie bieten damit eine transformative Chance für die Modernisierung und Innovation bei städtischen Infrastrukturen (SDG 9) und können im weiteren Sinne Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels durch Verbesserung der Effizienz von Systemen und Prozessen leisten.

Die Hypothesen lassen sich aufgrund des aktuellen Projektstatus in den meisten Fällen noch nicht abschließend überprüfen. Zumindest für die Hypothesen 1 und 2 lassen sich aber erste Annahmen ableiten:

Hypothese 1 - Instrument für die urbane Transformation

UDTs werden für das Management komplexer städtischer Systeme wie Energie, Wohnen und Verkehr eingesetzt.

Die untersuchten Projekte decken eine Vielzahl von räumlichen Ebenen ab und sind auf die Verbesserung der städtischen Lebensbedingungen ausgerichtet.

Hypothese 2 - Katalysator für den Aufbau von Kapazitäten

Viele Projekte sind ausdrücklich auf die SDG-Ziele ausgerichtet.

Während die transformativen Ambitionen klar sind, werden greifbare Ergebnisse erst noch entwickelt.

Nächste Schritte

Obwohl die Technologie vielversprechend ist, gibt es noch einige kritische Hindernisse, die in einer weiteren Phase der Studie in den Blick genommen werden müssen, um die Hypothesen validieren zu können. Dazu zählen folgende Aspekte:

- Technologische Beschränkungen: Berechnungsaufwand, fragmentierte Plattformen und Datenprobleme.
- Herausforderungen für die Verwaltung: Die Integration in bestehende Verwaltungsstrukturen ist oft unzureichend.
- Soziopolitische Risiken: Randgruppen könnten von der digitalen Teilhabe ausgeschlossen werden; algorithmische Entscheidungen könnten angefochten werden.

Um diese Faktoren einschätzen zu können, muss die Implementierung der UDT-Projekte zunächst abgeschlossen werden. Darüber hinaus müssen quantifizierbarer Leistungsindikatoren entwickelt werden, um einen systematischen Vergleich der beabsichtigten und zu beobachteten Auswirkungen in der alltäglichen Anwendung in den Stadtverwaltungen zu erarbeiten. Dazu werden auch Interviews mit den Beteiligten (Verwaltungspersonal, Stadtplaner etc.) geführt.

Schlussfolgerung

Diese Studie stellt eine vorläufige Bewertung von UDTs in Deutschland dar und positioniert sie als leistungsstarke, aber komplexe Instrumente für urbane Innovation. Während die Ergebnisse der ersten Phase das Potenzial für die urbane Transformation und die Ausrichtung auf die SDGs bestätigen, besteht weiterhin ein dringender Bedarf an standardisierten Praktiken, ethischen Sicherheitsvorkehrungen und inklusiver Governance. Detaillierte Evaluierungen, die in der nächsten Phase geplant sind, werden dazu beitragen, die langfristige Wirksamkeit für die nachhaltig-digitale Stadtentwicklung und besonders auch die sozialen Auswirkungen von UDTs besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

Adreani, L., Bellini, P., Fanfani, M., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2024). Smart City Digital Twin Framework for Real-Time Multi-Data Integration and Wide Public Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3406795

Borrás, Susana, Stine Haakonsson, René Taudal Poulsen, Trine Pallesen, Christian Hendriksen, Lucas Somavilla, Susanna Kugelberg, und Henrik Larsen. 2023. „The Transformative Capacity of Public Sector Organizations in Sustainability Transitions: A Conceptualization“. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2024.100904>

Bradshaw, R., & Kitchin, R. (2022). Charting the design and implementation of the smart city: The case of citizen-centric bikeshare in Hamilton, Ontario. *Urban Geography*, 43(4), 567–588. <https://doi.org/10.1080/02723638.2021.1878439>

Deng, Tianhu, Keren Zhang, und Zuo-Jun (Max) Shen. 2021. „A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities“. *Journal of Management Science and Engineering* 6(2):125–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003>

Fraunhofer IESE. 2024. Nachhaltige Stadtentwicklung: Mit Smart City und Digitaler Zwilling die Nachhaltigkeit von Städten fördern. Abgerufen 16. Oktober 2024 <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/nachhaltigkeit-stadtentwicklung/>

Halúsková, B. (2023). Digital Twin in Smart City. *Transportation Research Procedia*, 74, 1471–1478. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.308>

Hämäläinen, Mervi. 2021. „Urban Development with Dynamic Digital Twins in Helsinki City“. *IET Smart Cities* 3(4):201–10. DOI:10.1049/smc2.12015

Herzog, R. (2023). Exploring multi-modelling approaches in Hamburg, Germany's evolving digital urban twin infrastructure. 22nd International Conference on Modelling and Applied Simulation (MAS). <https://doi.org/10.46354/i3m.2023.mas.001>

Kelnberger, S., & Schonowski, J. (2022). DIN SPEC 91607. Digital Twin for cities and communities. DIN. Abgerufen 16.10.2024 <https://www.din.de/resource/blob/891788/72dfb62c52d4713407bd345e-b1e8571b/3-seiter-din-spec-91607-en-data.pdf>

Mora, L., Gerli, P., Ardito, L., Royall, E. B., Coenegrachts, K.-F., & de Jong, M. (2023). Confronting the Smart City Governance Crisis. *Technovation*, 123, 102717. https://senseable.mit.edu/papers/pdf/20250220_Mora-et-al_SmartCityGovernance_NCities.pdf

Mukhacheva, A. V., Ugryumova, M. N., Morozova, I. S., & Mukhachyev, M. Y. (2022). Digital Twins of the Urban Ecosystem to Ensure the Quality of Life of the Population. *ISPCR 2021 Conference Proceedings*, 331–338. DOI: 10.2991/aebmr.k.220208.047

Nochta, T., Wan, L., Schooling, J. M., & Parlikad, A. K. (2021). A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins. *Journal of Urban Technology*, 28(1–2), 263–287. <https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1798177>

Shahat, Ehab, Chang T. Hyun, und Chunho Yeom. 2021. „City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda“. *Sustainability* 13(6):3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>

United Nations. 2015. “Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform our World “. Abgerufen am 10. Oktober 2024 <https://www.un.org/en/exhibits/page/sdgs-17-goals-transform-world>

Van Twist, A., Ruijter, E., & Meijer, A. (2023). Smart cities & citizen discontent: A systematic review of the literature. *Government Information Quarterly*, 40(2), 101799. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101799>

Weil, Charlotte, Simon Elias Bibri, Régis Longchamp, François Golay, und Alexandre Alahi. 2023. „Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities“. *Sustainable Cities and Society* 99:104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>

Xia, H., Liu, Z., Efremochkina, M., Liu, X., & Lin, C. (2022). Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104009>

Xu, H., Omitaomu, F., Sabri, S. et al. Leveraging generative AI for urban digital twins: a scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement. *Urban Info* 3, 29 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44212-024-00060-w>

Impressum

Herausgeber

TUM Think Tank
Urban Digitainability Lab

Hochschule für Politik München
Richard-Wagner-Straße 1
80333 München
tumthinktank@hfp.tum.de
www.tumthinktank.de

April 2025

Verantwortlich

Prof. Dr. Stefan Wurster - Professur für Policy Analysis

Autor:innen

Andreas Marx
Thea Seidel

Förderung

Die Stiftung Mercator fördert das Urban Digitainability Lab am TUM Think Tank in ihrem Bereich „Digitalisierte Gesellschaft“. Die Stiftung Mercator ist eine private, unabhängige und gemeinnützige Stiftung. Seit 1996 tritt sie für eine solidarische und partizipative Gesellschaft ein. Dazu fördert und entwickelt sie Projekte, die Chancen auf Teilhabe und den Zusammenhalt in einem diverser werdenden Gemeinwesen verbessern. Die Stiftung Mercator setzt sich für ein weltoffenes, demokratisches Europa ein, eine an den Grundrechten orientierte digitale Transformation von Staat und Gesellschaft sowie einen sozial gerechten Klimaschutz.

Lizensierung

Diese Publikation sowie die darin enthaltenen Grafiken sind lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-SA 4.0).

