



DIGITALE ZWILLINGE VON GEBÄUDEN UND QUARTIEREN

Definition und Stand der Wissenschaft

Sebastian Herkel¹, Dr. Annette Steingrube¹, Cristina Balmus¹, Jan Kaiser², Heike Erhorn-Kluttig²

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE

²Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP

Kurzpapier im Rahmen des Projektes WiSE – Wissenschaftliche Synthese für die Energiewende in Gebäuden, Quartieren und Wärmenetzen

Projektnummer: 03EN3133

Datum: 31.03.2026

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Definition	3
2	Digitale Zwillinge und Ihre Abgrenzung zu anderen digitalen Modellen und Konzepten	3
3	Digitale Zwillinge von Gebäuden und Quartieren	6
3.1	Digitale Zwillinge von Gebäuden.....	6
3.2	Digitale Zwillinge von Quartieren / Urbane Digitale Zwillinge (UDZ)	6
3.2.1	Aktueller Stand der Wissenschaft	8
3.2.2	Herausforderungen	8
3.2.3	Daten und technische Umsetzung.....	8
4	Kurze Darstellung aktueller Forschungsarbeiten	9
5	Quellen	11
6	Enargus	12

Glossar

AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modelling
CAFM	Computer Aided Facility Management
CityGML	City Geography Markup Language
CUT	Connected Urban Twins
CPS	Cyber Physical System
DM	Data Mining
DT	Digital Twin
GA	Gebäudeautomation
GIS	Geographical Information System
GML	Geography Markup Language
HLK	Heizung, Lüftung, Kälte
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
KI / AI	Künstliche Intelligenz / Artificial Intelligence
LoD	Level of Detail (GIS), Level of Development (BIM)
LoI	Level of Information (BIM)
ML	Machine Learning
OGC	Open Geospatial Consortium
RL	Reinforcement Learning
UDZ	Urbane digitaler Zwilling
VR	Virtual Reality

1 Definition

Das Konzept des „Digitalen Zwillings“ bzw. „Digital Twin (DT)“ wurde als „living model“ im Rahmen der Apollo Mission in den 1960er entwickelt und seit Anfang der 2000er Jahre im Maschinen- und Anlagenbau im Kontext von „Industrie 4.0“ geprägt. Definitionen, normative Beschreibungen und Richtlinien für die Implementierung in der Domäne finden sich in der in der ISO 23247 Reihe „Digital Twin Framework for Manufacturing“ [1].

Eine einheitliche Definition für die bebauten Umwelt besteht nicht, basierend auf den internationalen, generischen Definitionen zu digitalen Zwillingen¹ wird im Entwurf der prEN 18162:2025-02 [2]: *„Building information modelling – Digitale Zwillinge in der bebauten Umwelt – Struktur und Definitionen“* der Digitale Zwilling als *„digitale Repräsentation einer Zielentität mit Datenverbindungen, die die Konvergenz zwischen einem physikalischen und digitalen Zustand mit einer angemessenen Synchronisationsrate ermöglichen“* definiert. Für sogenannte Urbane Digitale Zwillinge wurde eine DIN SPEC 91607:2024-11 [3]: *Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen* erarbeitet, die den Kontext umfassend aufbereitet, ohne eine eng gefasste Definition zu geben.

Eine recht breite Definition findet sich zum Beispiel auf den Seiten des britischen 5-Jahresprogramms Centre for Digital Built Britain: Digital Twins are *„realistic digital representations of physical assets, ... that can be used to monitor and predict performance, feeding out insights and interventions. These insights lead to better interventions and unlock real world value from assets through financial savings, improved performance and services, and better outcomes for society“*. Übersetzt man diese in Bezug auf gebäudetechnische Anlagen, Gebäude und urbane Systeme so schlagen die Autor:innen die folgende in diesem Aufsatz verwendete Definition vor:

„Ein Digitaler Zwilling ist eine strukturierte digitale Repräsentation eines Assets (Anlage in einem Gebäude, Gebäude, Liegenschaft oder urbanes System), deren Daten laufend, häufig bi-direktional über geeignete Schnittstellen mit dem physischen Objekt synchronisiert werden, sodass Planung, Errichtung, Betrieb, Umnutzung und Rückbau datenbasiert über den Lebenszyklus hinweg unterstützt werden.“

2 Digitale Zwillinge und Ihre Abgrenzung zu anderen digitalen Modellen und Konzepten

Die Abgrenzung von digitalen Zwillingen zu anderen digitalen Konzepten ist zum Teil fließend und nicht immer trennscharf möglich. In der Vergangenheit wurden für sehr ähnliche Konzepte teils andere Begrifflichkeiten verwendet, zusätzlich werden die Begriffe häufig simultan genutzt, was zu zusätzlicher Unsicherheit führen kann. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel eine Einordnung vorgenommen werden und andere Begrifflichkeiten, welche im Kontext digitale Modelle auftreten, werden kurz definiert und vom digitalen Zwilling abgegrenzt. Namentlich handelt es sich um Machine Learning ML, Cyberphysikalische Systeme CPS, Building Information Modelling BIM und Modelle der Stadt-, Gebäude- und Anlagensimulation. Eine Übersicht über die verschiedenen Konzepte und ihre mögliche Interaktion wird in Abbildung 1 dargestellt.

Ein sehr detailliertes Review zu den Gemeinsamkeiten und Abgrenzungen von digitalen Modellen und Konzepten in der Gebäude- und Anlagensimulation im Gebäudebereich als einer der ersten digitalen Konzepte seit den 1970er Jahren hat De Wilde 2023 veröffentlicht [4]. Die wichtigsten Definitionen und Aussagen dieses Aufsatzes sind im Folgenden zusammengefasst. Die Definitionen und Abgrenzungen in diesem Artikel beziehen sich zwar auf Anlagen und Gebäude, lassen sich aber gleichermaßen auf die urbanen digitalen Zwillinge übertragen.

Physikalische Simulationsmodelle

Physikalische Simulationsmodelle dienen der Vorhersage des Verhaltens und Performance eines Gebäudes oder Anlage im Betrieb. Die Modelle beruhen auf einer approximierten Abbildung der physikalischen Wirkmechanismen, sogenannte *„first principle models“*. Mit ihrer Hilfe kann z.B. der Betrieb einer Energieerzeugungsanlage, eines

¹ ISO/IEC 30173: 2023-11 Digital twin – Concepts and terminology

Wärmenetzes oder der Wärmebedarf in einem Gebäude simuliert werden. Diese Daten können wiederum im digitalen Zwilling gespeichert und weiterverarbeitet werden.

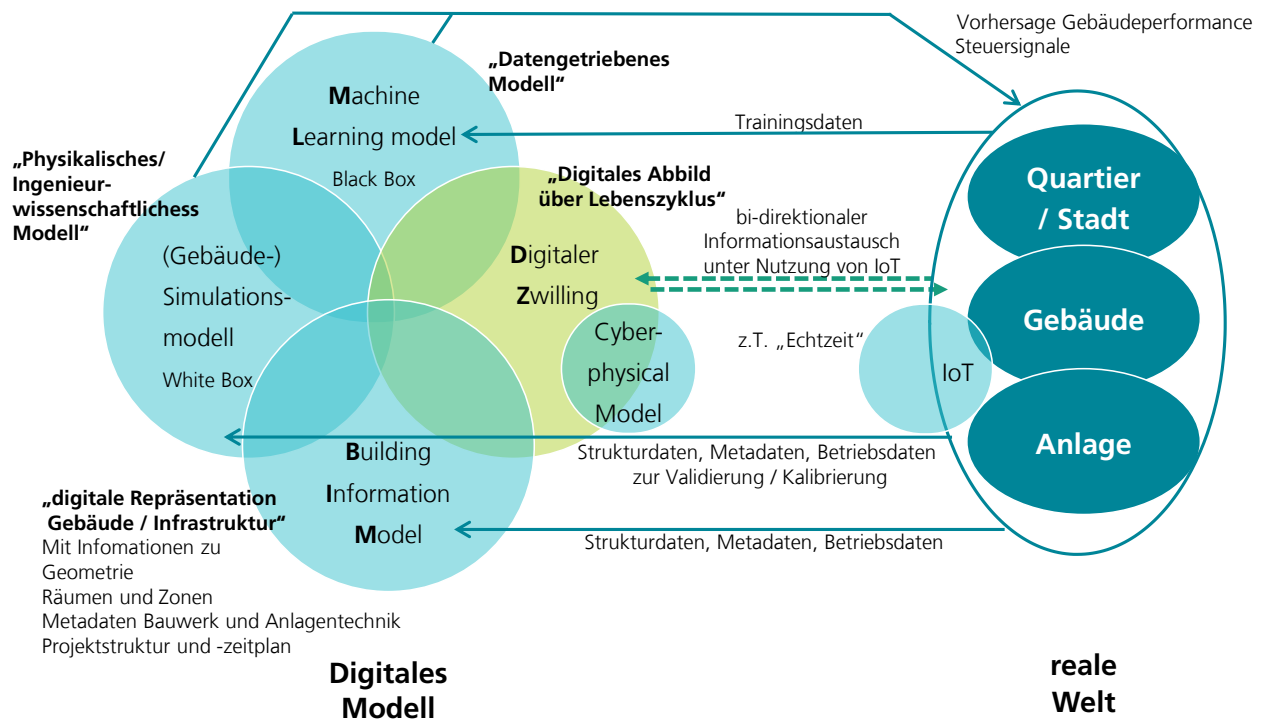


Abbildung 1: Modelle zur Abbildung von Urbanen Systemen, Gebäuden und Anlagen und dazugehörige Datenflüsse. Quelle: Eigene Darstellung nach [4].

Building Information Modeling

Bauwerksinformationsmodelle sind eine umfassende digitale Darstellung eines Gebäudes und erfassen typischerweise Informationen über die 3D-Geometrie des Gebäudes und seiner Systeme, über Räume und Zonen und Anlagen und definieren die Attribute des jeweiligen Bauteils oder Anlage. Die BIM Methodik gibt auch einen Rahmen zur Projektstruktur und den Terminplan eines Planungsprozesses. Ein BIM Modell kann als „as-build“ Modell auch in der Betriebsphase genutzt werden oder als Informationsspeicher zu verbauten Materialien beim Rückbau eines Gebäudes. Es enthält aber keine Informationen zu kurzfristigen Veränderungen zum Beispiel der Vorlauftemperatur in einem Wärmeversorgungssystem. BIM können wiederum in den digitalen Zwilling integriert werden, um Gebäude dort detailliert abzubilden.

Datengetriebene Modelle und Künstliche Intelligenz (KI)

Traditionell unterscheidet man symbolische KI (menschlich lesbare Repräsentationen, Logik, Regeln, Suche) und sub-symbolische KI (datengetriebene Modelle wie neuronale Netze). Anwendungen im Gebäudeumfeld zielen auf „smarte“ Gebäude, Quartiere und Städte, die auf Nutzer- und Organisationsbedürfnisse reagieren. KI deckt u. a. Wissensrepräsentation, Planung, Schlussfolgerungen, natürliche Sprachverarbeitung und die Überwachung und Steuerung technischer Systeme ab. Machine Learning (ML) ist ein Teilgebiet der KI und umfasst Algorithmen, die sich durch Daten und Erfahrung verbessern. Die Hauptklassen sind:

- Überwachtes Lernen (supervised): nutzt gelabelte Daten für Regression (numerische Vorhersagen), Klassifikation (Kategorien) sowie Optimierung/Regelung; typische Modelle sind lineare Modelle, Kernelmethoden, neuronale Netze, grafische Modelle, Mischungsmodelle/EM und Ensemble-Ansätze.

- Unüberwachtes Lernen (unsupervised): findet Muster ohne Labels; primär Clustering und Dimensionsreduktion.
- Bestärkendes Lernen (reinforcement): Agenten treffen sequenzielle Entscheidungen bei begrenztem Feedback; z.B. geeignet für adaptive Regelungen.

Im Gebäudeumfeld wird ML in Energie- und Tageslichtprognosen, struktureller Analyse, Fehlerdiagnose und in der Optimierung von Regelstrategien (z. B. HLK) eingesetzt. Data Mining (DM) ist die Muster- und Wissensentdeckung in großen Datenbeständen mithilfe von ML, Statistik und Datenbanktechnologien. Man unterscheidet deskriptive Techniken (Daten beschreiben/segmentieren) und prädiktive Techniken (Ergebnisse vorhersagen). „Big Data“ kennzeichnet große Vielfalt, Volumen und Geschwindigkeit. Im Gebäudebereich ist Data Mining zentral für Energieeffizienzanalysen, Betriebsoptimierung, Anomalieerkennung und die Auswertung von IoT-Datenströmen. Häufig werden DM, ML und IoT kombiniert, um Smart-Building-Funktionen zu realisieren. KI kann also z.B. genutzt werden, um Informationen aus dem digitalen Zwilling auszuwerten oder aus den Informationen weitergehende Erkenntnisse zu gewinnen.

Cyber-Physical Systems (CPS)

CPS vernetzen physische und cyber/softwarebasierte Komponenten nahtlos. Anders als beim DT muss das cyber-System die physische Anlage nicht explizit abbilden; es kann als „intelligentes“ Steuerungssystem verstanden werden. Bausteine umfassen Regelung, Datenanalyse, ML (inkl. Echtzeit), Netzwerke, Safety/Security, Verifikation und Human-in-the-loop. Im Gebäudeumfeld entsprechen CPS weitgehend modernen Gebäudeautomationssystemen: vernetzte Sensoren/Aktoren, Echtzeit-Regelung, autonome Funktionen und sichere, robuste Betriebsführung.

Internet of Things (IoT)

IoT vernetzt beliebige Geräte über das Internet zur Erfassung und zum Austausch von Zustands-, Nutzungs- und Umgebungsdaten. In Gebäuden umfasst dies drahtlose Sensorik, Smart Meter, Raumklimasensoren, vernetzte Aktoren und die Kopplung mit Cloud-/Edge-Verarbeitung. IoT kann mit BIM oder DT integriert werden, um digitale Modelle laufend mit Messdaten zu versorgen und ereignisbasierte Automatisierung (z. B. Fenster „offen“ → Heizungsabsenkung) zu ermöglichen. Durch IoT können also Daten gewonnen werden, welche wiederum im digitalen Zwilling gespeichert und mit anderen Daten vernetzt werden, um neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Zusammenspiel und Abgrenzung

Für die Praxis ist es sinnvoll, die Konzepte komplementär zu verstehen: IoT liefert Daten, DM/ML extrahieren Muster und Prognosen, CPS setzt sie in Steuerung um, durch KI ergeben sich neuartige Methoden der Datenauswertung, Alle diese Konzepte können also im Rahmen eines digitalen Zwillings genutzt werden, um Daten zu gewinnen, weiterzuverarbeiten und daraus zum Beispiel Maßnahmen, Regelungsstrategien oder Handlungsempfehlungen zu entwickeln.

Zusätzlich zu den Abgrenzungen zu anderen digitalen Konzepten werden in der Literatur auch verschiedene Voraussetzungen diskutiert, um ein digitales Konzept als DT bezeichnen zu können [5]. Drei Punkte, welche häufig genannt werden, sollen kurz erörtert werden:

- **Datenaustausch:** Ein Datenaustausch zwischen dem physikalischen und dem virtuellen System muss automatisiert stattfinden, wobei eine automatisierte Anpassung des physikalischen Systems durch Änderungen im virtuellen System nicht unbedingt erfolgen muss. Die Rückkopplung vom digitalen System ins reale System kann auch händisch erfolgen, in dem die Informationen aus dem DT zum Beispiel für die Planung genutzt werden.
- **Genauigkeit/Auflösung der Abbildung:** Eine bestimmte Auflösung des virtuellen Abbildes festzulegen ist nahezu unmöglich, da diese von den zur Verfügung stehenden Daten abhängt, Gerade im urbanen Kontext ist die Datenverfügbarkeit für die digitalen Zwillinge häufig eine Herausforderung, so dass eine Vorgabe für die Auflösung nicht zielführend ist.

- **Datenaktualisierungsrate:** In der Literatur wird häufig von Echtzeitdatenübertragung als Voraussetzung für einen digitalen Zwilling gesprochen, die jedoch unter verfügbarer Infrastruktur häufig gar nicht möglich ist und je nach Anwendungsfall auch nicht nötig. Deswegen sollte die Echtzeitdatenübertragung nicht unbedingt als Voraussetzung definiert werden.

3 Digitale Zwillinge von Gebäuden und Quartieren

Im den folgenden Teilkapiteln werden Spezifika von digitalen Zwillingen für Gebäude und Quartiere näher erläutert. Für die Gebäude liegt der Schwerpunkt auf den Zielen, Vorteilen gegenüber anderen digitalen Konzepten und der Entwicklung einheitlicher Standards.

Urbane digitale Zwillinge haben wesentlich breitere Einsatzzwecke, weswegen sowohl die verschiedenen Einsatzzwecke, Ziele und auch Stakeholder wie auch die technische Umsetzung nochmals mehr vertieft wird.

3.1 Digitale Zwillinge von Gebäuden

Ziel eines digitalen Zwillings von Gebäuden ist vereinfachtes Datenmanagement und höhere Effizienz von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen („Assets“) durch die Bereitstellung eines herstellerübergreifenden Informationsaustauschs auf Basis branchenneutraler Standards für Kommunikation, Dienste (z.B. Betriebsüberwachung) und einheitlicher Semantik. Heute sind viele verschiedene Ausprägungen „digitaler Zwillinge“ in der Forschung und am Markt zu sehen. Assets in Gebäuden können z.B. eine Nutzungszone, Anlage, Komponente, Material, Produkt, Software, Dokumente sein. In der prEN 18162:2025-02 [2] werden Prozesse ebenfalls als Asset bezeichnet. Für viele der im Rahmen eines digitalen Zwillings abbildbaren Prozesse gibt es bereits Begrifflichkeiten und langjährige Erfahrungen. Wichtig sind die Gebäudeautomation GA, die die einzelnen Anlagen über Sensoren und Aktoren steuert und regelt, das Computer Aided Facility Management CAFM und das Building Information Modelling BIM, welches vor allem die Daten und Prozesse bei der Planung und Errichtung des Gebäudes strukturiert. Zur Rolle von BIM in digitalen Zwillingen hat die buildingSMART Digital Twins Working Group drei Positionspaper zur zukünftigen Entwicklung veröffentlicht [6–8] und kommt zu dem Schluss: „Der Übergang zu cyber-physischen Systemen bietet eine erhebliche Chance, die Effizienz, Resilienz und Nachhaltigkeit der gebauten Umwelt zu verbessern. Durch die Nutzung digitaler Zwillinge, GIS, Sensoren, Big Data und weiterer aufkommender Technologien können wir Systeme schaffen, die nicht nur effektiver, sondern auch anpassungsfähiger an die sich wandelnden Bedürfnisse der Gesellschaft sind. Offene Standards werden für diesen Wandel entscheidend sein, da sie Innovationen fördern und eine nahtlose Zusammenarbeit über Sektorgrenzen hinweg ermöglichen. Diese Transformation betrifft jedoch nicht nur die Technologie. Sie erfordert einen Mentalitätswandel, eine Neubewertung von Branchenstandards und ein Umdenken in Governance-Strukturen. ...“. Die organisatorische Transformation (Kompetenzen, Rollen, Prozesse, Governance) wird damit zum Schlüssel für den Nutzen digitaler Zwillinge in Gebäuden.

In der ISO 23247:2021-10 *Digital Twin Framework for Manufacturing* wird definiert, wie mittels einer Asset Administration Shell (kurz: AAS; deutsch: Verwaltungsschale, normiert in IEC 63278) ein solches Asset als digitaler Zwilling beschrieben wird. In einem gemeinsamen Leitfaden haben buildingSmart Deutschland e.V. und Industrial Digital Twin Association e.V. (IDTA) eine Handlungsanweisung entwickelt, wie eine Integration von Maschinen, gebäudetechnischen Anlagen und externen Geräten mittels Verwaltungsschale (ASS) in ein BIM-Gebäudemodell erfolgen kann [bSM 2025]. Solche standardisierten Schnittstellen und Datenmodelle (z.B. AAS) dienen als Basis für Interoperabilität und Skalierbarkeit. Ein Digitaler Zwilling kann in dieser Form als virtuelles, dynamisch gekoppeltes Abbild des Gebäudes über alle Lebenszyklusphasen verstanden werden, er dient dabei als „Single Source of Truth“ durch ein konsistentes, semantisch angereichertes Datenmodell aus BIM, GA, IoT und CAFM.

3.2 Digitale Zwillinge von Quartieren / Urbane Digitale Zwillinge (UDZ)

Angelehnt an die allgemeine Definition ist ein Urbane Digitaler Zwilling (UDZ) eine digitale Repräsentation eines Gebietes, welche die verschiedenen verfügbaren Ressourcen wie Daten, Strukturen, beteiligte Akteure:innen und Prozesse in einem umfassenden Rahmenwerk zweckorientiert zusammenstellt. Ein UDZ beinhaltet sowohl statische Daten in unterschiedlichen Formaten, räumlichen und zeitlichen Auflösungen, als auch Echtzeitdaten bzw. Monitoringdaten, welche im Vergleich zu reinen Geoinformationssystemen im Idealfall einen bidirektionalen Datenaustausch ermöglichen. Eine dynamische Verbindung zwischen dem realen Objekt und der digitalen Repräsentation ist

allerdings nicht immer erforderlich, erstrebenswert oder möglich [9]. Bezüglich der Infrastruktur, kann ein UDZ entweder als eigenständige Anwendung gebaut werden oder aus mehreren zusammenarbeitenden Datenplattformen, Analysen, Simulationen oder einzelnen Anwendungen bestehen. In diesem letzten Fall stellt das UDZ ein echtes Ökosystem dar. [10,11]

Im urbanen Kontext werden folgende Anwendungen von UDZ bereits realisiert. Eine Übersicht ist zum Beispiel in [12] zu finden. Dabei kann ein digitaler Zwilling von einer bis mehrerer dieser Anwendungen in Form sogenannter Layer enthalten sein. Auf konzeptioneller Ebene lassen sich die Anwendungen in vier Kategorien einteilen: Monitoring, Simulation, optimierter Betrieb, optimierter Auslegung/Planung [13]. Diese umfassen zum Beispiel:

- Verkehrsüberwachung und –planung
- Darstellung und Planung von Energieinfrastrukturen
- Monitoring von Energiedaten, Nutzung der Daten für das Energiemanagement
- Analyse und Entwicklung von Maßnahmen gegen Klimawandelfolgen wie Urban Heat Islands, Überflutung, etc.
- 3D-Stadtplanung und Integration von Gebäudemodellen (BIM/IFC)
- Planung und Überwachung von Abwassersystemen
- Überwachung von Lärmquellen
- Luftverschmutzung

Abbildung 2 stellt die Anwender*innen, Datenquellen, Ziele und bidirektionalen Verbindungen dar, welche ein urbaner digitaler Zwilling haben kann. Dabei ist wichtig anzumerken, dass dies mögliche Ausprägungen darstellt, welche nicht immer alle erfüllt sein müssen.

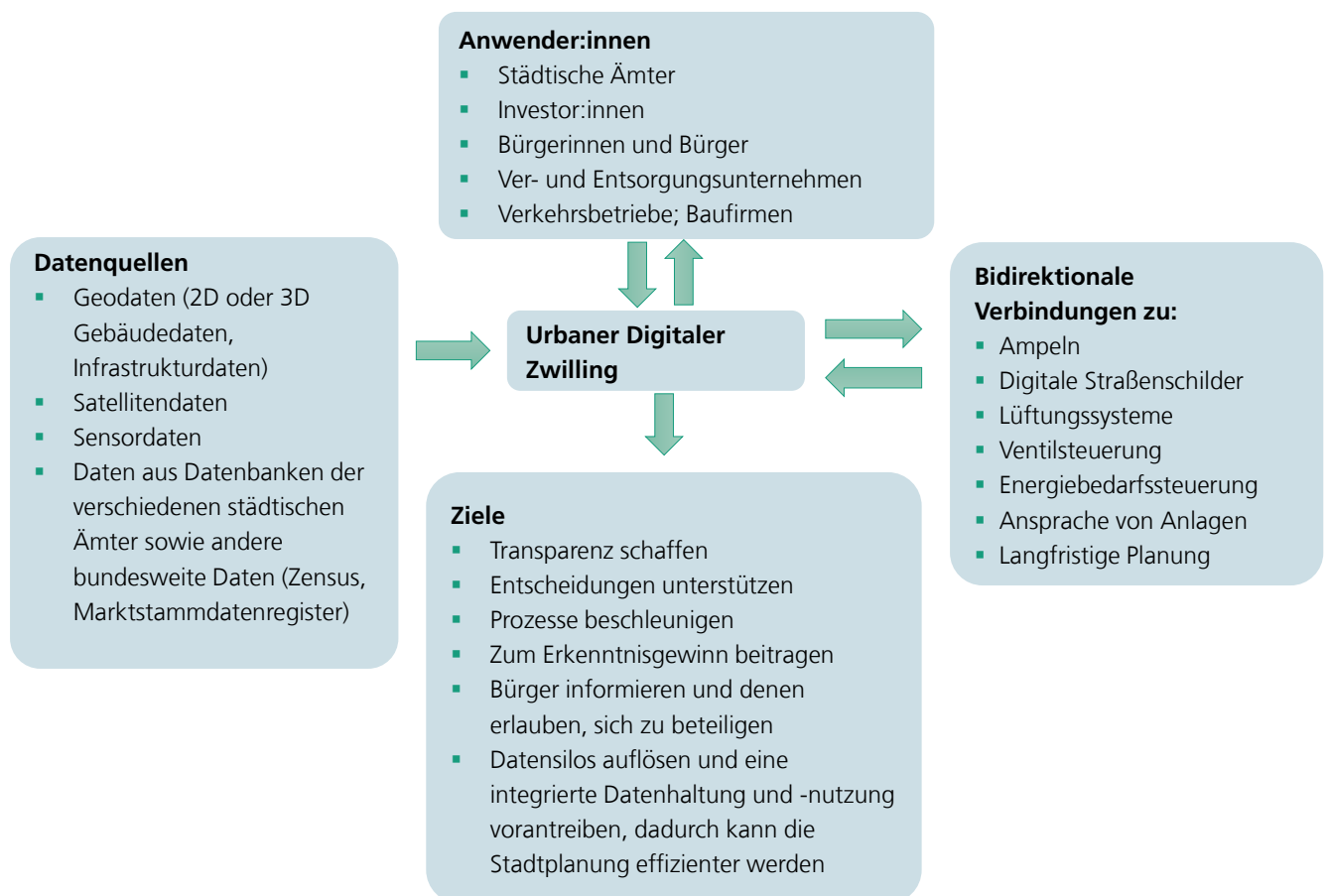


Abbildung 2: Der Urbane Digitale Zwilling als komplexes digitales Ökosystem einer Stadt

3.2.1 Aktueller Stand der Wissenschaft

Sowohl in Deutschland als auch weltweit gibt es zahlreiche Beispiele für den Einsatz von UDZ, die eine große Bandbreite an Entwicklungsständen darstellen. Nennenswert sind die Anwendungen der Städte Rotterdam (Niederlande), Helsinki (Finnland), Cambridge (England), Zürich (Schweiz), Singapur oder Tokyo (Japan). In Deutschland müssen an dieser Stelle das Verbundprojekt Connected Urban Twins (CUT) aus Hamburg, Leipzig und München, sowie die Projekte der Städte Köln, Mönchengladbach und Freiburg erwähnt werden. Die Stadt Leipzig z.B. hat einen Urbanen Digitalen Zwilling als Basis für die Visualisierung von Fachinformationen aus dem Solarkataster, dem Gründachkataster oder der Lärmkartierungsuntersuchung. Die Stadt Zürich bietet seinen Digitalen Zwilling unter dem Begriff „Responsive City“ an, indem eine Vielzahl an digitalen Werkzeugen entwickelt worden sind und die Einbindung der Bürger:innen im Vordergrund steht. Der UDZ der Stadt Zürich bietet darüber hinaus die Möglichkeit, 3D-BIM-Modelle hochzuladen und zu visualisieren. Eine Übersicht aktueller Forschungsprojekte zum Thema wird in Kapitel 4 gegeben.

Eine Klassifizierung der verschiedenen UDZ gestaltet sich schwierig insbesondere auf Grund der sehr anwendungsspezifischen Ziele eines UDZs. Dennoch kann vereinfacht z.B. zwischen statischen und dynamischen UDZ unterschieden werden [11]. In den statischen UDZ werden eine Reihe an 3D- und 2D-Daten in eine Fachanwendung integriert, in der Regel mit dem Zweck, die Daten zu visualisieren und relativ einfache Analysen und Simulationen für Entscheidungsprozesse durchzuführen. Manche Städte bewegen sich allerdings in Richtung dynamischer Urbaner Digitaler Zwillinge, indem sie VR/AR Interaktionen anbieten, Sensordaten integrieren oder sogar AI-Elemente einsetzen. Hier können z. B. die UDZ der Städte Rotterdam (Niederlande) oder Tampere (Finnland) erwähnt werden. Für diese Art von komplexeren Simulationen sind noch keine festen Standards etabliert worden, hauptsächlich auf Grund der Komplexität der Verfahren, der IT-Anforderungen, der Kosten und vor allem der insgesamt fehlenden Standardisierung.

3.2.2 Herausforderungen

Die Herausforderungen im Bereich UDZ sind vielfältig und werden von unterschiedlichen Aspekten hervorgerufen. Zum einen sind es die verschiedenen Fachgebiete mit ihren Datenquellen, Datenqualitäten und -aktualitäten, die sehr heterogen sind und in einer funktionalen Anwendung zusammengefasst werden müssen. Obwohl versucht wird, auf internationale Standards bezüglich den Datenformaten zuzugreifen, gibt es immer Differenzen zwischen den Datenanbietern oder Fälle, wo eine weitere Verarbeitung oder Aufbereitung der Daten (z.B. Aggregation/Disaggregation) erforderlich ist. Zweitens werden einzelne oder Gruppen von Akteur:innen mit unterschiedlichen Bedürfnissen oder Interessen betrachtet. Daraus ergeben sich manchmal zwangsläufig mehrere eigenständige Instanzen eines UDZs je nach Anwendungsfeld (z.B. Energieplanung, Stadtplanung, Verkehrsplanung etc.) für eine bestimmte Stadt [3] [10]. Weiterhin sind UDZ in der Regel sehr ressourcenintensiv in Aufbau und Betrieb und benötigen eine Infrastruktur sowie Verantwortliche für dieses Thema. Nicht zuletzt werden für UDZ in der Regel große Mengen an Daten prozessiert, u.a. sehr detaillierte 3D-Modelle und Echtzeit-Messungen, sowie komplexe Prozessierungs- und Analysewerkzeuge eingesetzt.

3.2.3 Daten und technische Umsetzung

UDZ sind komplexe Systeme, die Daten und Informationen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen miteinander verbinden und einen übergreifenden Datenaustausch [14] ermöglichen. Sie bestehen aus Modellen von Objekten oder Prozessen, können allerdings daneben zahlreiche Simulationen, Algorithmen, Services und weitere Daten enthalten (siehe Kapitel 2).

Der erste Grundstein für den Aufbau eines UDZs stellt in der Regel ein 3D-Stadtmodell dar, das in den meisten Fällen auf dem internationalen OGC Daten- und Austauschformat City Geography Markup Language (CityGML) basiert. Die Objekte aus verschiedenen thematischen Bereichen wie Gebäude, Bäume, Tunnel, Vegetation, Gelände, Brücken, Verkehr etc. werden in 4 Detaillierungsgraden (Levels of Detail – LoD) mit ihrer 3D-Geometrie, 3D-Topologie, Semantik und Erscheinung repräsentiert.

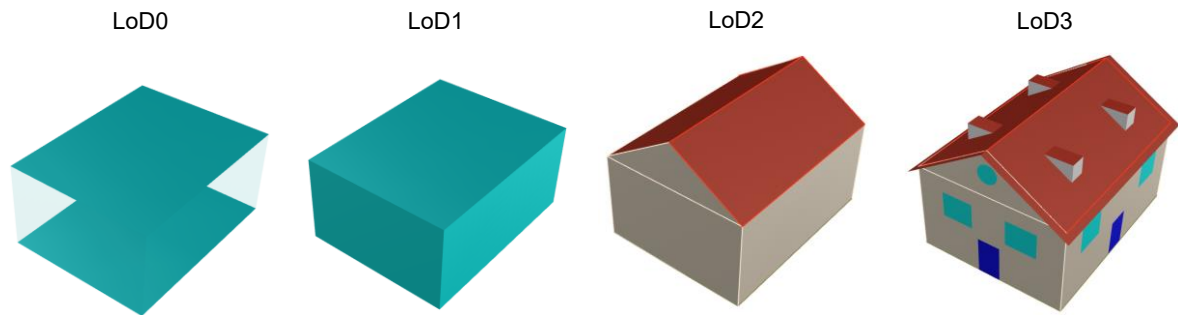


Abbildung 3: Die Detaillierungsgrade eines 3D-Objektes (in diesem Fall ein Gebäude) im CityGML 1.0 Format. Quelle: Eigene Darstellung nach [15].

Je nach Zweck der Anwendung können UDZ darüber hinaus aus 3D-Meshes oder 3D-Punktwolken mit Texturen oder Farbinformation bestehen. Diese sind reine Geometriemodelle ohne Struktur oder Semantik, die aber eine fotorealistische Darstellung der 3D-Objekte anbieten.

In einem UDZ können auch semantische 3D-Modelle von individuellen Bauwerken mit integriert und visualisiert werden. Ein BIM Modell umfasst in Regel umfangreiche Daten, die ein Gebäude durch seinen ganzen Lebenszyklus von Entwurf und Planung bis hin zur Ausführung und Betrieb begleitet [16]. Die 3D-Modelle in BIM können auch verschiedene Detaillierungsgrade (LoD – Level of Development) haben und werden ebenfalls durch semantische Informationen (LoI – Level of Information) beschrieben. Der wichtigste offene Standard für den Austausch von 3D-BIM-Modellen ist IFC (Industry Foundation Classes), der die Geometriedaten (Gebäudeelemente, HLK-Anlagen, elektrische Systeme, Sanitärausstattungen etc.) sowie die alphanumerischen Informationen wie z.B. Materialien oder Eigenschaften von einem Bauwerk übertragen kann.

Ein UDZ kann über Sensorbeobachtungen mit seinem realen, physischen Modell verbunden werden. Diese Verbindung erfolgt durch den Anschluss physischer Geräte (Sensoren und Aktuatoren) an das Internet und wird mit dem Begriff IoT beschrieben. Die Sensoren können Wetterstationen, spezielle Detektoren für unterschiedlichen Anwendungen oder Smart-Meter installiert in Gebäuden sein.

Digitale Geländemodelle, Luftbilder oder Satellitenbilder sind ebenfalls Beispiele an Daten, die nahezu standardmäßig zu UDZ gehören.

Im Rahmen eines UDZs werden in der Regel sehr großen Dateien mit einer komplexen Struktur abgespeichert und ausgetauscht. Für eine effiziente und interaktive Visualisierung über das Web sind solche Dateien grundsätzlich weniger geeignet. Dafür müssen diese in 3D-Visualisierungsmodellen und -datenformaten überführt werden, wodurch die meiste Zeit eine Aufteilung in Form einer hierarchischen Kachelung stattfinden muss [17]. Mit Hilfe dieser Kachelung werden nur die relevanten Daten für den visualisierten Ausschnitt des 3D-Modells geladen und dargestellt, wodurch eine bessere Performance und eine Speicheroptimierung gewährleistet werden können. Die Visualisierungsmodelle werden weiterhin in verschiedenen Anwendungen wie VR/AR-Anwendungen, Web-basierte Plattformen oder Game-Engines integriert, um Benutzer:innen den Zugang zu den 3D-Daten zu ermöglichen.

4 Kurze Darstellung aktueller Forschungsarbeiten

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben zum Thema Digitale Zwillinge in der angewandten Energieforschung in Gebäuden und Quartieren, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Tabelle 1: Inhalte ausgewählter Forschungsprojekte zum Thema digitaler Zwilling

Thema	Projekte	Inhalt der Projekte in Bezug auf das Thema
DT von Wärmenetzen	<ul style="list-style-type: none"> - FlexWaerme - DingFEST 	<ul style="list-style-type: none"> - FlexWaerme: Abbildung von Wärmenetzen mit dezentralen und sektorgekoppelten Erzeugungsanlagen - DingFEST: Abbildung dezentralisierter Wärmenetze mit volatiler, verteilter Einspeisung

DT von Quartieren	<ul style="list-style-type: none"> - EnEff:Stadt: Campus_Lichtwiese_II - EnStadt: ENaQ - EnEff:Stadt: EOS - DigiTwins4PEDs 	<ul style="list-style-type: none"> - EnEff:Stadt: Campus_Lichtwiese_II: digitaler Zwilling des Campusenergiesystems - EnStadt: ENaQ: sektorgekoppeltes Energiesystem im Quartier - EnEff:Stadt: EOS: optimierter Energieeinsatz von Strom, Wärme und Kälte in einer Energie-Plus-Siedlung - DigiTwins4PEDs: Abbildung von Positive Energy Districts
DT von Gebäuden	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DataFEE - EnOB: EnergyTWIN - EnOB: EffTecMoR - Comm-X 	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DataFEE: Energieverbrauch in Wohngebäuden - EnOB: EnergyTWIN: (automatisierte) Erzeugung eines 'Digitalen Zwillings' bei der Inbetriebnahme der Gebäudetechnik und dessen kontinuierliche Fortführung mit Informationsanreicherung in der Betriebs- und Nutzungsphase - EnOB: EffTecMoR: Abbildung hochkomplexer Gebäude im Betrieb - Comm-X: Reduzierung des Energieverbrauchs von Gebäuden, z.B. durch Monitoring, prädiktive Wartung, Fehlerdetektion und intelligente Regelstrategien wie modellprädiktive Regelung
DT von Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: BIMPV - EnOB: DZWi - EnOB: HeaTwin - SMART-KS 	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: BIMPV: Fassaden PV - EnOB: DZWi: digitale Zwillinge unterschiedlicher energetischer Erzeugungsanlagen - EnOB: HeaTwin: Abbildung komplexer Wärmeversorgungsanlagen - SMART-KS: Digitaler Zwilling von Kälteanlagen für Rechenzentren
Betrieb/ Betriebsoptimierung	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DataFEE - EnOB: BIMPV - EnOB: HeaTwin - EnOB: EffTecMoR - Comm-X - EnEff:Stadt: Campus_Lichtwiese_II - EnStadt: ENaQ - FlexWaerme - DingFEST - SMART-KS 	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DataFEE: Möglichkeit Daten aus der Entwurfsphase mit Daten aus dem Betrieb abzugleichen, um Einfluss des Nutzendenverhaltens zu analysieren - EnOB: BIMPV: Monitoring von Fassaden PV - EnOB: HeaTwin: automatisierten Erstellung thermohydraulischer Simulationsmodelle für komplexe Wärmeversorgungsanlagen auf Basis digitaler Anlagenschemata (als Graphenmodell), die aus BIM-Daten gewonnen werden - SMART-KS: Optimierung der Regelung von verschiedenen Komponenten von Kälteanlagen für Rechenzentren - EnOB: EffTecMoR: Monitoring und Optimierung von Innenraumklima hochkomplexer Gebäude - Comm-X: Das Projekt Comm-X zielt darauf ab, ein Ökosystem zu entwickeln, das einen Datenraum für digitale Zwillinge technischer Gebäudeausrüstung und einen Marktplatz für Software-Services umfasst - EnEff:Stadt: Campus_Lichtwiese_II: Monitoring in Verbindung mit Flexibilitätsoptionen - EnStadt: ENaQ: Aufbau einer Datencloud und eines digitalen Zwillings zur Abbildung der Infrastruktur - FlexWaerme: Das Projekt FlexWaerme zielt darauf ab, eine Live-Co-Optimierung des Energiemanagements und des Wärmenetzsystems zu entwickeln - DingFEST: Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines hochaufgelösten 'Digitalen Zwillings' für eine dynamische Echtzeitoptimierung komplexer Fernwärmesysteme mit heterogenen Erzeugungsstrukturen - SMART-KS:
Mehrere Phasen (Planung, Betrieb, ...)	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DZWi - EnOB: EnergyTWIN - EnEff:Stadt: EOS 	<ul style="list-style-type: none"> - EnOB: DZWi: alle Phasen (Planung, Betrieb, ..) der energetischen Erzeugungsanlagen sollen abgebildet und begleitet werden - EnOB: EnergyTWIN: automatisierte Datenerhebung, auch mittels KI - EnEff:Stadt: EOS: Durch die Kopplung des Echtzeitmodells mit Messungen entsteht ein Digitaler Zwilling. Der Digitale Zwilling bietet die notwendigen Freiheitsgrade für planerische Untersuchungen und umfangreiche Simulationen verschiedener Szenarien
Informativonstool	<ul style="list-style-type: none"> - DigiTwins4PEDs 	<ul style="list-style-type: none"> - DigiTwins4PEDs: Um den Prozess der Bürgerbeteiligung zu unterstützen, werden neue Werkzeuge und Methoden unter Verwendung von Urban Digital Twins entwickelt und angepasst, die es den Bürger:innen

ermöglichen, die Energie-wende in ihren Gemeinden voranzutreiben und besser informiert Entscheidungen zu treffen

5 Quellen

- [1] ISO/TC 184/SC 4. ISO 23247-1:2021-10 - Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles;25.040.40, 35.240.50; 2021.
- [2] Arbeitsausschuss NA 005-13-06 AA "Digitale Zwillinge in der bebauten Umwelt (SpA CEN/TC 442/WG 6, CEN/TC 442/WG 9)" im DIN-Normenausschuss Bauwesen. DIN EN 18162:2025-02 - Entwurf - Building information modelling - Digitale Zwillinge in der bebauten Umwelt - Struktur und Definitionen;35.240.67; 2025.
- [3] DIN SPEC 91607:2024-11, Digitale Zwillinge für Städte und Kommunen. Berlin: DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/3575521>.
- [4] Wilde P de. Building performance simulation in the brave new world of artificial intelligence and digital twins: A systematic review. *Energy and Buildings* 2023;292:113171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113171>.
- [5] VanDerHorn E, Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems* 2021;145:113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>.
- [6] Beetz J, van Berlo L, Borrman A, Enzer M, Frey C, Hartmann U et al. Enabling an Ecosystem of Digital Twins: A buildingSMART International Positioning Paper. How to unlock economic, social, environmental and business value for the built asset industry; 2020.
- [7] Brink B, Enzer M, Mercer A, Weiss F. Enabling an Ecosystem of Digital Twins – An Update: A buildingSMART Digital Twins Working Group Paper; 2023.
- [8] Brink B, Enzer M, Mercer A, Weiss F. Digital Twins and the Systems Perspective: A buildingSMART Digital Twins Working Group Paper; 2024.
- [9] Dr. Sarah Brandt, Jens Henningsen, Steffen Hess, Dr. Andreas Jedlitschka - Fraunhofer ISE, Rene Hellmuth - Fraunhofer IAO. Digitale Zwillinge: Potenziale in der Stadtentwicklung. [March 30, 2026]; Available from: <https://www.smart-city-dialog.de/digitale-zwillinge-potenziale-der-stadtentwicklung>.
- [10] Kolbe TH. Definition des Begriffs „Urbane Digitaler Zwilling“: Internes Schulungsmaterial zu dem Zertifikatskurs "Digitale Zwillinge für Städte" an der TU München. Arbeitspapier; 2026.
- [11] Helmons C. Climate Resilient Rotterdam: Internes Schulungsmaterial zu dem Zertifikatskurs "Digitale Zwillinge für Städte" an der TU München; 2026.
- [12] Ferré-Bigorra J, Casals M, Gangolells M. The adoption of urban digital twins. *Cities* 2022;131:103905. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>.
- [13] Davila Delgado JM, Oyedele L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics* 2021;49:101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>.
- [14] Kolbe TH. Digitale Zwillinge für Städte - Urban Digital Twins: Internes Schulungsmaterial zu dem Zertifikatskurs "Digitale Zwillinge für Städte" an der TU München; 2026.
- [15] Open Geospatial Consortium. OGC City Geography Markup Language (CityGML) 3.0 Conceptual Model Users Guide. [March 10, 2026]; Available from: <http://www.opengis.net/doc/UG/CityGML-user-guide/3.0>.
- [16] Borrman A. Digital Twins for Cities - Building Information Modeling: Internes Schulungsmaterial zu dem Zertifikatskurs "Digitale Zwillinge für Städte" an der TU München; 2026.
- [17] Kolbe TH. 3D-Visualisierung von Digitalen Modellen: Internes Schulungsmaterial zu dem Zertifikatskurs "Digitale Zwillinge für Städte" an der TU München; 2026.

6 EnArgus Daten der Projekte

Ausgegraute Projekte sind nicht Teil von Energiewendebauen und werden deswegen in der in Kapitel 4 vorgenommenen Clusterung nicht berücksichtigt.

Titel	Förderzeitraum	Bewilligte Summe	Ausführende Stelle	Förderkennzeichen
EnOB: DataFEE - Data mining, machine learning, feedback, and feedforward - Energieeffizienz durch nutzungszentrierte Gebäudesysteme - Teilvorhaben: Digitaler Zwilling	2019-07-01 – 2023-06-30	497.969,00 €	Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Valley	03EN1002C
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektivischer BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: BIM-basiertes Informationsmanagement zur Lebenszyklusbetrachtung von BIPV-Anlagen	2020-12-01 – 2024-08-31	686.986,27 €	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - Fakultät 3 - Bauingenieurwesen - Lehrstuhl und Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, Aachen	03EN1010A
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Ertragsprognose und Betriebsanalyse	2020-12-01 – 2024-08-31	600.597,97 €	Institut für Solarenergieforschung GmbH, Emmerthal	03EN1010B
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Gebäudesimulation und Charakterisierung von Prototypen	2020-12-01 – 2024-08-31	198.911,00 €	Center for Applied Energy Research e.V., Würzburg	03EN1010C
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Recycling und retrospective Lebenszyklenanalyse	2020-12-01 – 2024-08-31	115.455,41 €	bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg	03EN1010D
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusoptimierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Weiterentwicklung einer CDE (Common Data Environment) als Plattform für den BIM-Ansatz von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle.	2020-12-01 – 2024-08-31	178.958,00 €	albert.ing GmbH, Frankfurt am Main	03EN1010E
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilprojekt: Digitale Kollaboration und Datenaufbereitung	2020-12-01 – 2024-08-31	100.547,00 €	Lang Hugger Rampp GmbH, München	03EN1010F
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektivischer BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Planung und Installation einer BIPV-Fassadenanlage	2020-12-01 – 2024-08-31	244.952,00 €	nD-System GmbH, Hannover	03EN1010G
Verbundvorhaben: EnOB: BIMPV - Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle - Teilvorhaben: Errichtung & Betrieb Real- & Digitallabor (Pilotobjekt BIPV)	2020-12-01 – 2024-08-31	105.015,00 €	nD-Enerserve GmbH, Hemmingen	03EN1010H
Verbundvorhaben: EnOB: DZW i - Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergietechnik; Teilvorhaben: Entwicklung von Systemkomponenten für einen Digitalen Zwilling	2020-10-01 – 2024-03-31	599.128,00 €	E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Aachen	03EN1022B
Verbundvorhaben: EnOB: DZW i - Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugungssystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudetechnik; Teilvorhaben: Validierung von Systemkomponenten für einen Digitalen Zwilling	2020-10-01 – 2024-03-31	104.232,61 €	Glen Dimplex Deutschland GmbH, Kulmbach	03EN1022C
Verbundvorhaben: EnOB: DZW i - Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergietechnik; Teilthema: Erprobung des Digitalen Zwilling	2020-10-01 – 2024-03-31	181.567,62 €	Viessmann Holding International GmbH, Allendorf (Eder)	03EN1022D

Digitale Zwillinge von Gebäuden und Quartieren: Definition und Stand der Wissenschaft

Verbundvorhaben: EnOB: EnergyTWIN - Energiediagnosestecker Digitaler Zwilling: ...; Teilvorhaben: As-built-Erfassung und KI-basierte Methoden	2020-07-01 – 2024-06-30	1.177.813,39 €	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, Aachen	03EN1026A
Verbundvorhaben: EnOB: EnergyTWIN - ... - Teilvorhaben: Virtuelle und augmentierte Realität	2020-07-01 – 2024-06-30	196.770,00 €	TEMA Technologie Marketing AG, Aachen	03EN1026B
Verbundvorhaben: EnOB: EnergyTWIN - ...; Teilvorhaben: EnergyTWIN App	2020-07-01 – 2024-06-30	143.602,00 €	Internet Marketing Services GmbH, Bückeburg	03EN1026D
Verbundvorhaben: EnOB: EnergyTWIN - ... Teilvorhaben: KI zur Erkennung der Topologie und Funktionsweise	2020-07-01 – 2024-06-30	165.453,17 €	aedifion GmbH, Köln	03EN1026E
Verbundvorhaben: EnOB: HeaTwin - Automatisierte Erstellung thermo-hydraulischer Simulationsmodelle ...; Teilvorhaben: Entwicklung und Test der Methodik zur automatisierten Modellerstellung	2024-04-01 – 2027-03-31	570.416,04 €	Universität Kassel - Fachbereich 15 Maschinenbau - Institut für Thermische Energietechnik (ITE) - FG Solar- und Anlagentechnik, Kassel	03EN1091A
Verbundvorhaben: EnOB: HeaTwin: ...; Teilvorhaben: Erprobung der Methodik im anwendungsnahen Umfeld	2024-04-01 – 2027-03-31	130.789,27 €	Viessmann Holding International GmbH, Allendorf (Eder)	03EN1091B
Verbundvorhaben: EnOB: EffTecMoR - Leuchtturmvorhaben zur Entwicklung adaptiver Regelstrategien ... Teilvorhaben: Komplexes Monitoring und prädiktive Regelung zur Effizienzsteigerung	2025-01-01 – 2027-12-31	540.441,00 €	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin	03EN1101B
Verbundvorhaben: HeatTransX - Wärmetransformation von Niedertemperaturverteilungssystemen mittels Wärmepumpen; Teilvorhaben: Digitaler Systemzwilling und Laborversuche	2025-07-01 – 2028-06-30	232.981,45 €	Technische Universität Dresden - Fakultät Maschinenwesen - Institut für Energietechnik - Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, Dresden	03EN1105C
Verbundvorhaben: Comm-X – freier Datenraum und Marktplatz für den optimierten Betrieb kommunaler Gebäude; Teilvorhaben: Entwicklung von Informationsmodellen zur Integration interoperabler Gebäudeservices für Gebäude in einem kommunalen Marktplatz	2025-11-01 – 2028-10-31	107.528,33 €	PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH, Blomberg	03EN1113F
EnEff:Stadt: Campus_Lichtwiese_II: Weiterentwicklung eines Energiesystems auf Quartiersebene	2019-01-01 – 2023-09-30	4.390.943,77 €	Technische Universität Darmstadt - Fachbereich Architektur - Professor Christoph Kuhn, Darmstadt, Hessen	03ET1638
Verbundvorhaben EnStadt: ENaQ - Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg - Teilvorhaben: Smart City und Smart Energy Datencloud	2018-01-01 – 2024-12-31	1.097.100,00 €	embeteco GmbH & Co. KG, Oldenburg, Niedersachsen	03SBE111I
Verbundvorhaben: FlexWaerme – Erhöhung der Marktflexibilität von Fernwärmesystemen durch Ende-zu-Ende Optimierung im Echtzeit-Betrieb; Teilvorhaben: Digitale Zwillinge der Wärmenetze	2026-01-01 – 2028-12-31	520.985,01 €	Gradyent GmbH, Emsbüren, Berlin	03EN3137A
Verbundvorhaben: EnEff:Stadt: EOS - Energetische Optimierung einer Energie-Plus-Siedlung auf Systemebene; Teilvorhaben: Digitaler Zwilling einer Energie Plus Siedlung	2024-03-01 – 2027-02-28	450.076,90 €	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg - Technische Fakultät - Department Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik - Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme, Erlangen, Bayern	03EN3099A
Verbundvorhaben: EnEff:Stadt: EOS - Energetische Optimierung einer Energie-Plus-Siedlung auf Systemebene; Teilvorhaben: Echtzeit-simulierte Digitale Zwillinge zur Energetische Optimierung einer Energie-Plus-Siedlung auf Systemebene	2024-03-01 – 2027-02-28	170.806,34 €	OPAL-RT Germany GmbH, Nürnberg, Bayern	03EN3099D
Verbundvorhaben: EnEff:Wärme: DingFEST - Digitaler Zwilling zur flexibilisierten und effizienzoptimierten Steuerung dezentralisierter Fernwärmenetze; Teilvorhaben: ITWM:Mathematische Modellentwicklung und Implementierung des digitalen Zwillings	2021-01-01 – 2024-12-31	399.191,00 €	Fraunhofer-Institut für Technik und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz	03EN3015B
Verbundvorhaben: DUT-P: DigiTwins4PEDs - Nutzung städtischer digitaler Zwillinge zur gemeinsamen Schaffung flexibler positiver Energiesysteme für	2023-11-01 – 2026-04-30	299.323,83 €	Hochschule für Technik - Institut für angewandte Forschung Zentrum für nachhaltige	03EN3081A

Digitale Zwillinge von Gebäuden und Quartieren: Definition und Stand der Wissenschaft

Stadtteile; Teilvorhaben: Projektkoordination und Fallstudie Stuttgart			Energietechnik, Stuttgart, Baden-Württemberg	
Verbundvorhaben: SMART-KS - System zur Minimierung des PUE durch Anwendung von Retrofit-Technologien in Kälte-Systemen von Rechenzentren; Teilvorhaben: Aufbau und Anwendung der KI-Plattform 'Digitaler Zwilling'	2025-04-01 – 2028-03-31	398.543,97 €	etalytics GmbH, Darmstadt, Hessen	03EN6050D
Verbundvorhaben: Vom Plan zur Wende: ResQEnergy: Resilientes Energiesystem für Technologiequartiere; Teilprojekt: Digitaler Zwilling & Transfer	2025-01-01 – 2027-12-31	263.587,40 €	WISTA Management GmbH, Berlin, Berlin	03EI1096A
Verbundvorhaben: EPH-FuE - Energiepark Herzogenrath Forschung und Entwicklung; Teilvorhaben: Erforschung sektorenübergreifender, teilautonomer Energiemanagementverfahren für Energiesystemkomponenten und verschiedene industrielle Anwendungen	2023-07-01 – 2026-06-30	914.349,11 €	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - Fakultät 6 - Elektrotechnik und Informationstechnik - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), Aachen, Nordrhein-Westfalen	03EE1167C
Verbundvorhaben: EPH-FuE -Energiepark Herzogenrath Forschung und Entwicklung; Teilvorhaben: Gesamtenergiesystemoptimierung inklusive Mobilität	2023-07-01 – 2026-06-30	787.588,53 €	Siemens Energy Global GmbH & Co. KG - SE NEB TP, Erlangen	03EE1167A
Verbundvorhaben: AURA - Auslegung und Betrieb von PV-Fassaden; Teilvorhaben: Untersuchung von Prüfmethode für PV-Fassaden, Optimierung der Systemtechnik und Entwicklung des digitalen Zwillings einer PV-Fassade	2023-02-01 – 2026-07-31	898.384,60 €	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart, Baden-Württemberg	03EE1139A
Verbundvorhaben: CoMap - Digitaler Echtzeit-Zwilling für eine Kontinuierliche und Flexible System-Abbildung; Teilvorhaben: Entwicklung der Echtzeit-Modelle und des Messanalysators	2022-12-01 – 2025-05-31	799.216,64 €	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE), Kassel, Hessen	03EI6080B