



Digitale Zwillinge in der Energiewirtschaft

Konzepte und erfolgreiche Einführung
by VDE ETG

Empfohlene Zitierweise

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:

Digitale Zwillinge in der Energiewirtschaft – Konzepte und erfolgreiche Einführung, VDE Impuls, Offenbach am Main, Februar 2026

Dieses VDE Impulspapier ist das Arbeitsergebnis des VDE ETG Arbeitskreises „Digitaler Zwilling“.

Autoren:

Dr.-Ing. Hanno Stagge, TenneT TSO GmbH

Dr. techn. Andreas Strasser, Austrian Power Grid AG

Apl. Prof. Dr.-Ing. Ulf Häger, Technische Universität Dortmund

Dipl.-Ing. Anke Kunze, BIM FOR ENERGY CONSULTING

Dr.-Ing. Christoph Brosinsky, TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG

Weitere Mitwirkende:

Erhard Aumann, Siemens AG

Martin Breitenbach, NGN Netzgesellschaft Niederrhein mbH

Wolfgang Eyrich, entegra eyrich + appel GmbH

Bastian Fischer, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH

Hon. Prof. Dr.-Ing. Heinrich Hoppe-Oehl, Bergische Universität Wuppertal

Jan Oliver Kammesheidt, Eplan GmbH & Co. KG

Dr.-Ing. Kristof Kamps, NGN Netzgesellschaft Niederrhein mbH

Gert Mehlmann, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Dr. Andreas Schmelter, Westfalen Weser Netz GmbH

Timo Wagner, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Vorbemerkung

VDE Impulspapiere geben – entsprechend der Positionierung des VDE als neutraler, technisch-wissenschaftlicher Verband – gemeinsame Erkenntnisse der jeweiligen Arbeitsgruppen wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wider.

Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik

Elektronik Informationstechnik e.V.

Energietechnische Gesellschaft (ETG)

Merianstraße 28

63069 Offenbach

Tel. +49 69 6308-346

etg@vde.com

www.vde.com/etg

Titelbild: © ZinetronN/stock.adobe.com

Design: Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

Februar 2026

Inhalt

Executive Summary	4
1 Motivation und Einordnung	5
1.1 Hinweis zur Aktualität	5
1.2 Digitale Zwillinge in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft: Inhalt dieses Berichts	5
1.3 Rahmenbedingungen	6
1.3.1 Strategie der Europäischen Union	6
1.3.2 Leistungsstarke Verbraucher gefährden die Power Quality	6
1.3.3 Batteriespeicher ermöglichen mehr Netzflexibilität und Wirtschaftlichkeit	7
1.3.4 KI als wichtiger Baustein für eine intelligente Netzsteuerung	7
1.3.5 Cybersicherheit	7
1.3.6 Trends und Zukunftsfähigkeit	7
1.4 Zweck und Nutzen von Informationen	9
2 Digitaler Zwilling: Definitionen, Modelle und Standardisierung	10
2.1 Startpunkt	10
2.2 Digitale Asset-Informationsmodelle	10
2.3 Digitaler Zwilling	10
2.3.1 Definition nach ISO 30173	11
2.3.2 Definition Digitaler Zwilling des VDE	11
2.3.3 Einordnung der Begriffe	11
2.4 Standardisierung als Basis für Interoperabilität	11
3 Rundum-Betrachtung von Digitalen Zwillingen	12
3.1 Reifegrad Digitaler Zwillinge	12
3.2 8 Dimensionen	13
3.3 Kritikalität und Echtzeitfähigkeit	13
3.4 Individuelle vs. föderierte Digitale Zwillinge	14
3.5 Vernetzung und Integration	15
3.6 Einordnung Digitaler Zwillinge im Cyber-Physischen System	16
4 Methodischer Wandel als Erfolgsfaktor für Digitale Zwillinge	18
4.1 Neue Denkweise für föderierte Digitale Zwillinge	18
4.2 System Engineering und Smart Grid Architecture Model im Zusammenspiel	18
4.2.1 Erweiterter methodischer Werkzeugkasten: Sicherheit, Qualität und Testbarkeit	19
4.2.2 Die zentrale Lücke: fehlende Standards für Digitale Zwillinge im Energiesektor	20
4.2.3 Europäischer Lückenschluss als Grundlage für föderierte Digitale Zwillinge	20
5 Organisatorischer Wandel als Erfolgsfaktor für Digitale Zwillinge	21
5.1 Aktive Gestaltung und Zusammenarbeit in der gesamten Kette	21
5.2 Erfolgsfaktoren und Hindernisse in der eigenen Organisation	22
5.3 Organisationsüberblick Digitaler Zwilling bei Netzbetreibern	22
6 Ausblick	25
7 Anhang: Smart Grid Architecture Model	26

Executive Summary

Der Begriff „Digitaler Zwilling“ ist ein Schlagwort der heutigen Zeit – viele Ideen und Visionen verbinden sich damit, aber wenig davon ist bisher erfüllt. Außerdem ist das Verständnis des Begriffes in verschiedenen Branchen sehr unterschiedlich – teilweise aber auch in der eigenen Organisation.

Mit dem Bericht „Digitale Zwillinge in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft“ hat die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) im Jahr 2023 zunächst eine Definition geschaffen und das Konzept sowie verschiedene Anwendungsfälle erläutert. Anschließend wurden Arbeitsgruppen installiert, die verschiedene Themen um Digitale Zwillinge weiterbearbeiten. Mitglieder dieser Arbeitsgruppen sind außerdem bei anderen Verbänden und Organisationen der elektrischen Energiewirtschaft wie ENTSO-E oder CIGRE in entsprechenden Arbeitsgruppen, um die Erkenntnisse zu synchronisieren.

Dieser Bericht beschreibt das Konzept Digitaler Zwillinge aus einer Business-Perspektive und zeigt die weitreichenden Implikationen dieser auf Geschäftsprozesse, Betriebsabläufe und die Integration in bestehende Systeme. Konkret werden Definitionen und verschiedene Sichtweisen aufgezeigt und der notwendige methodische und organisatorische Wandel vorgestellt, um Digitale Zwillinge zum Erfolg zu führen.

Um die Versorgungssicherheit weiter in heutiger Qualität aufrecht zu erhalten und föderierte und ganzheitliche Digitale Zwillinge zu ermöglichen, ist eine starke Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Parteien notwendig. Hierbei muss der Netzbetreiber als Systemintegrator auftreten und Schnittstellen, Standards und Qualitätskriterien vorgeben. Hersteller und Softwareentwickler fungieren als wichtige strategische Partner für die Umsetzung und die Weiterentwicklung der digitalen Möglichkeiten. Wenn Organisationen weiterhin auf individuelle Digitale Zwillinge setzen, ohne diese im Kontext eines übergeordneten Systems einzuordnen und zu strukturieren, entstehen mittel- bis langfristig erhebliche Integrationsaufwände. Die Einbindung heterogener Zwillinge in ein Gesamtsystem wird dadurch zunehmend komplex – bis hin zur faktischen Unbeherrschbarkeit.

Standardisierung ist die Basis für die Digitalisierung – ohne Standards können (technische) Systeme nicht automatisiert kommunizieren und Informationen können nicht aggregiert werden. Unter anderem sollten Referenzarchitektur und Betriebsmittelkennzeichnung, Objektklassen und die semantische Beschreibung in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft vereinheitlicht sein. Auf dieser Basis können anschließend weitere Details wie konkrete Merkmale für verschiedene Objektklassen standardisiert werden. Bei Standardisierung ist es außerdem wichtig, dass die zusammenarbeitenden Parteien gegenseitiges Verständnis haben und bereit sind, Kompromisse einzugehen.

1 Motivation und Einordnung

Die Elektrizitätsversorgung ist Teil der kritischen Infrastruktur einer Gesellschaft. Die Transformation des europäischen Energiesystems mit der steigenden Elektrifizierung in allen Bereichen und dem dezentralen Ausbau volatiler erneuerbarer Erzeugungsanlagen steigern die Komplexität und die Anforderungen an unsere Netze. Wichtige Eckpfeiler für die Energiewende bleiben der Netzausbau sowie die Modernisierung der bestehenden Netzinfrastruktur. Beides muss in immer größeren Projekten und zeitlich dicht getaktet umgesetzt werden. Für einen effizienten und sicheren Netzbetrieb ist es entscheidend, dass Betriebsinformationen der Anlagen verfügbar sind und genügend Anlagen für die Netzsteuerung genutzt werden können. So lässt sich die Auslastung erhöhen und der Bedarf an zusätzlichem Netzausbau reduzieren.

Parallel sollen auch die Kosten für Netze und Energieanlagen im Bau und im Betrieb reduziert werden. Für den Bau der Anlagen ergibt sich eine Reduzierung von Kosten und Zeit vor allem durch anlagen- und betreiberübergreifende Standardisierung. Dazu gehört auch eine Standardisierung aller zu liefernden Informationen durch Hersteller und Zulieferer. Nur mit einer einheitlichen und vordefinierten Datenstruktur können Hersteller alle notwendigen System- und Produktinformationen in hoher Qualität bereitstellen. Nur dann können Anlagenbetreiber diese Informationen effizient in ihre Digitalen Zwillinge übernehmen und diese der Netzplanung, Netzsteuerung und dem Assetmanagement für die Instandhaltung zur Verfügung stellen.

Kostenreduzierung für den Betrieb erfordert neue generalisierbare Konzepte in der Instandhaltung und im Asset Management. Predictive Maintenance oder die Reaktion auf bekannte Zustände sowie der Einsatz von übergreifenden, standardisierten Datenplattformen steigern die Effizienz im Vergleich zu festen Wartungsintervallen. Digitalisierung ist der Schlüssel für intelligente Netze, die Flexibilisierung des Energiesystems, die effizientere Nutzung von Energie sowie für neue Geschäftsmodelle: **Die „Digitalisierung des elektrischen Energiesystems“ ist folglich ein Fokusthema der VDE ETG.**

Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Digitalisierung wird aber auch die entsprechende Infrastruktur benötigt: Notwendige Informationen müssen durch Sensoren erfasst und mit Kommunikationstechnik übermittelt sowie in die Zielsysteme und Datenbanken gebracht werden.

1.1 Hinweis zur Aktualität

VDE ETG und die Autoren der verschiedenen Berichte und anderen Beiträge erkennen an, dass „die Digitalisierung“ in den 2020er-Jahren eine bisher nicht gekannte Dynamik und insbesondere mit der Weiterentwicklung von KI-Systemen einen disruptiven Charakter erreicht hat. Veröffentlichte Beiträge spiegeln den Wissensstand zum Zeitpunkt ihrer Erstellung wider. Daher sollten sie stets auf Aktualität und Anwendbarkeit überprüft werden. Die VDE ETG und die installierten Arbeitsgruppen diskutieren fortlaufend neue Erkenntnisse und Weiterentwicklungen und bemühen sich, nicht mehr aktuelle Informationen entsprechend zu kennzeichnen und, wenn sinnvoll und möglich, aktualisierte Versionen bereitzustellen. Um diese Aktualität zu ermöglichen, wurde eine Homepage als Übersichtsseite zur [„Digitalisierung des elektrischen Energiesystems“](#) eingerichtet.

1.2 Digitale Zwillinge in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft: Inhalt dieses Berichts

Um die notwendigen Informationen von Anlagen für alle Nutzenden und (automatischen) Prozesse effizient bereitzustellen, können Digitale Zwillinge verwendet werden:

Digitale Zwillinge werden allgemein als virtuelles Abbild von physischen Systemen, Software oder Prozessen verstanden und beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus des realen Systems.

Dieser Bericht beschreibt das Konzept Digitaler Zwillinge aus einer Business-Perspektive und zeigt die weitreichenden Implikationen digitaler Zwillinge auf Geschäftsprozesse, Betriebsabläufe und die Integration in bestehende Systeme. Konkret werden Definitionen in Kapitel 2 und verschiedene Sichtweisen in Kapitel 3 aufgezeigt. Technische Details finden sich in separaten Beiträgen über die genannte Webseite [Digitalisierung des elektrischen Energiesystems](#). Kapitel 4 und 5 stellen den notwendigen methodischen und organisatorischen Wandel vor, um Digitale Zwillinge zum Erfolg zu führen. Kapitel 6 gibt einen Ausblick zu dem Themenfeld.

1.3 Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden verschiedene Rahmenbedingungen aufgeführt, die für Digitale Zwillinge relevant sind.

1.3.1 Strategie der Europäischen Union

Unabhängigkeit, langfristiges Wirtschaftswachstum und die Förderung von Umweltschutz in Europa erfordern disruptive und innovative Ansätze über Unternehmens- und Landesgrenzen hinaus. Diese Ziele erfordern mutige Entscheidungen und das Brechen von traditionellen Regeln und Mustern. Dieses Aufbrechen ist auch in den politischen Entscheidungen und strategischen Ausrichtungen der Europäischen Kommission deutlich erkennbar. Die Schaffung unterschiedlicher Initiativen ermöglicht erst die sinnvolle Umsetzung von operativen Digitalen Zwillingen. Diese können in drei Kategorien aufgeteilt werden:

- **Regulatorische Rahmenbedingungen**

Verfügbare Daten und ein widerstandsfreier Austausch von Daten stellen die Grundlage Digitaler Zwillinge dar. Dieser Aspekt wurde auch in der Europäischen Datenstrategie erkannt und zwei wesentliche Verordnungen geschaffen: Der Data Governance Act¹ (Schaffung von Europäischen Datenräumen (Data Spaces) für die Förderung von sektorenübergreifenden Diensten) und der Data Act (regelt den Datenaustausch für vernetzte Produkte und harmonisiert damit verbundene Dienstleistungen. Er zielt darauf ab, Hindernisse für den Datenzugang und die Datennutzung zu beseitigen, die Dateninteroperabilität zu verbessern und personenbezogene Daten zu schützen).

- **Ganzheitliche Betrachtung**

Viele Rechtsakte, Initiativen und europäische Strategie- und Visionspapiere werden in unterschiedlichen Arbeitsgruppen erstellt. In den letzten Jahren hat sich insbesondere aus Sicht der Netzbetreiber ein unübersichtliches Bild ergeben. Gleichzeitig wird eine stärkere Zusammenarbeit in Europa und zwischen Übertragungsnetz- und Verteilnetzbetreibern gefordert. Um hier zielgerichteter vorzugehen, wurden von Seiten der Europäischen Kommission mehrere EU-Aktionspläne geschaffen (Digitalisierung des Energiesystems, Netto-Null Industrie Act, Stromnetze). Diese Aktionspläne beinhalten Handlungsfelder mit Einzelinitiativen, um die Europäischen Visionen zu unterstützen. Digitale Zwillinge als auch die Europäischen Datenräume sind explizit Teil des EU-Aktionsplanes Digitalisierung des Energiesystems.

- **Zusammenarbeit unter Netzbetreibern**

Die äußeren Umstände erfordern eine immer stärkere Zusammenarbeit unterschiedlicher Akteure im Energiesektor. Hierbei ist besonders die Schnittstelle TSO-DSO zwischen Übertragungsnetzbetreiber (TSO) und Verteilnetzbetreiber (DSO) zu erwähnen. Aufgrund der starken Konvergenz dieser Systeme wurde auf europäischer Ebene neben der seit 2009 existierenden ENTSO-E, welche die Übertragungsnetzbetreiber vertritt, auch die DSO-Entity gegründet, welche als Vertretung aller europäischer Verteilnetzbetreiber gilt. Hieraus haben sich auch mehrere gemeinsame (Joint) Task Forces ergeben, welche gemeinsam unter anderem an den oben genannten Projekten arbeiten, vgl. Kapitel 1.3.6.

In Deutschland sind für die Zusammenarbeit bereits verschiedene Anwendungsregeln in Kraft, wie z.B. Zusammenarbeit an der Schnittstelle von Übertragungs- und Verteilnetz (VDE-AR-N 4141-1), die Zusammenarbeit an der Schnittstelle zwischen zwei Verteilnetzbetreibern (VDE-AR-N 4141-2).

1.3.2 Leistungsstarke Verbraucher gefährden die Power Quality

Neue Gefahren entstehen in den Stromnetzen der Verteilnetzbetreiber nicht nur durch volatile Einspeisung der erneuerbaren Energien, sondern auch durch leistungsstarke Verbraucher wie Elektroautos und Wärmepumpen. Neben der Einhaltung der Netzqualität (z.B. Netzfrequenz bei 50 Hz) muss auch eine ausreichende Power Quality gewährleistet sein, so dass alle angeschlossenen Geräte bestimmungsgemäß ohne signifikante Leistungseinbußen oder Lebensdauerverkürzungen funktionieren.

¹ European Data Governance Act | Shaping Europe's digital future

1.3.3 Batteriespeicher ermöglichen mehr Netzflexibilität und Wirtschaftlichkeit

Eine weiter steigende Komplexität in den Netzen ergibt sich durch den Einsatz von Batterie-Energiespeichersystemen (BESS). Neben der Erbringung von Regelleistung ermöglichen BESS das derzeit bedeutendste Geschäftsmodell „Arbitrage Trading“-Geschäft, bei dem die Vorteile der unterschiedlichen Preissignale am Markt genutzt werden. Bei gewerblichen oder industriellen Nutzern werden BESS auch zur Lastspitzenkappung oder zur Lastverschiebung eingesetzt.

Die Herausforderung besteht jedoch nicht nur in der Bereitstellung von Speicherkapazitäten, sondern insbesondere in deren intelligenter, marktgerechter Steuerung. Technische Betriebsführung und wirtschaftliche Optimierungsstrategien müssen synchronisiert werden.

1.3.4 KI als wichtiger Baustein für eine intelligente Netzsteuerung

Ein vielversprechendes Werkzeug für die zukünftige Netzstabilität ist die künstliche Intelligenz (KI). Sie kann klassische Regelwerke für die Netzsteuerung ergänzen, aber nicht ersetzen. Mit wachsender Dezentralisierung und Volatilität sowie unsicheren Vorhersagen durch die Integration erneuerbarer Energiequellen wie Wind und Sonne in die bestehende Netzinfrastruktur entstehen komplexe und dynamische Herausforderungen. Erste datengetriebene Optimierungsansätze mit KI-Methoden, um aus Daten der Vergangenheit Voraussagen für die Zukunft abzuleiten, sind für die Bereitstellung Digitaler Zwillinge zur Netzsimulation in der Entwicklung. Sprachzentrierte Agentensysteme sollen unstrukturierte Informationen wie Nachrichtenmeldungen oder regulatorische Informationen für Entscheidungsprozesse optimiert bereitstellen. Darüber hinaus zeigt sich, dass auch KI-Systeme ähnliche organisatorische Entwicklungen erfordert wie Digitale Zwillinge. Daher ist es sinnvoll, beide Ansätze gemeinsam zu denken und integriert weiterzuentwickeln, um Doppelstrukturen oder neue Silos zu vermeiden. KI kann gemäß der Studie „[Künstliche Intelligenz in der Netzleittechnik](#)“ und dem „[EU AI Act](#)“ die Netzstabilität unterstützen, erfordert jedoch klare Strukturen, Transparenz und robuste Governance, idealerweise eng verzahnt mit Anforderungen an Digitale Zwillinge.

1.3.5 Cybersicherheit

Neue und komplexe Herausforderungen zur Cybersicherheit² von Energieanlagen ergeben sich u.a. durch

- **technologische Entwicklungen**
Cyberkriminelle Gruppen setzen Ransomware zur Erpressung von Energieunternehmen ein
- **geopolitische Spannungen**
Staatlich gestützte Cyberoperationen zielen auf Spionage und Destabilisierung
- **regulatorische Veränderungen**
„Hacktivisten“ verfolgen ideologische Ziele, etwa im Kontext von Klima- oder Energiepolitik

Diesen neuen bzw. sich erweiternden Gefahren ist auch bei der Entwicklung und praktischen Umsetzung von Digitalen Zwillingen Rechnung zu tragen.

1.3.6 Trends und Zukunftsfähigkeit

Zur Digitalisierung sind derzeit in verschiedenen Sektoren und auf unterschiedlichen Ebenen Vorgaben oder Trends in Vorbereitung oder Umsetzung, die auch das elektrische Energiesystem beeinflussen und bei der Entwicklung von Digitalen Zwillingen berücksichtigt werden müssen.

² Positionspapier: Cybersicherheit im Energiesektor Deutschlands

Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht in Stichworten.

Themenfeld	Trend in Stichworten
Räumliche Anlagenplanung	Geoinformationssysteme (GIS)
Anlagenbau und Anlagenstrukturen mit zugehörigen Informationen	VGBE-S-831 Technische Dokumentation Building Information Modeling (BIM) und IFC-Format ISO 16739
Digitale Produktinformationsbeschaffung	Digitaler Produktpass (DPP) Asset Administration Shell (AAS)
Produktbeschaffung	ECLASS und weitere System-Breakdown-Strukturen Enterprise Resource Planning Systeme (ERP)
Betriebsmittelkennzeichnung	IEC 81346
Informationsaustausch in Schaltanlagen u.a.	IEC 61850
Informationsaustausch in Energienetzen	Common Information Model (CIM) Common Grid Model Exchange Specification (CGMES)
Netzbetrieb	Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
Märkte	Datenökosysteme

Tabelle 1: Trends im Zusammenhang mit Digitalisierung von elektrischen Energiesystemen

Bereits existierende Vorschriften für die verschiedenen Informationsebenen von Energieanlagen und Netzen sind für die Digitalen Zwillinge anzuwenden und zukunftsfähig weiterzuentwickeln. Interoperabilität und möglichst auch Rückwärtskompatibilität sind sicherzustellen. Zusammenarbeit über verschiedene Verbände und Gremien sowie über Länder und Kontinente ist notwendig, damit keine Silos entstehen. Wie in Kapitel 6 beschrieben, suchen die Autoren aktiv die Zusammenarbeit; mit Stand dieses Berichtes wird in folgenden anderen Gruppen bei verschiedenen Organisationen am Themenfeld „Digitaler Zwilling“ (mit unterschiedlichen Definitionen und Ausprägungen) gearbeitet:

- [IEEE PES Working Group of Digital Twin for T&D Power Equipment](#)
- [IEEE PES Task Force on Digital Twin of Large-Scale Power Systems](#)
- [CIGRE JWG B3/D2-62 Life-long Supervision and Management of Substations...](#)
- [CIGRE JWG A3/D2.52 Application of Digital Twin in Switchgear](#)
- [CIGRE JWG A2/D2.65 Transformer Digital Twin - Concept and future perspectives](#)
- [Joint Task Force on the Digitalisation of the Energy Action Plan \(DESAP\)³](#)
- [ENTSO-E RDIC WG5 Task Force Digital Twins](#)
- [DSO4DT - DSOs for Digital Twins, coordinated by DSO Entity](#)
- [TwinEU-Project](#)
- [int:net-Project](#)
- [INSIEME](#) als ein Beispielprojekt für Data-Spaces

Mitglieder der VDE ETG Arbeitsgruppe zum Digitalen Zwilling der Netz- und Elektrizitätswirtschaft wirken auch in mehreren der genannten Gruppen mit und sorgen für eine Vereinheitlichung der Inhalte. Dadurch werden ähnliche Formulierungen, Erklärungen und Abbildungen in den verschiedenen Gruppen genutzt. Dies ist ausdrücklich erwünscht.

³ Die Gruppe hat diesen Bericht veröffentlicht: [Joint Report on TSO-DSO Digital Twin Use Cases - DSO](#)

1.4 Zweck und Nutzen von Informationen

Für alle Entscheidungen und Aktionen in Bezug auf Funktionsbausteine und die dafür eingesetzten Bauteiltypen als individuelle Bauteile (Assets) eines Netzbetreibers sind akkurate und vollständige Informationen notwendig.⁴

Die im Netz eindeutig gekennzeichneten Funktionsbausteine (Systeme und Teilsysteme) erzeugen einen Wert für die Netzbetreiber, indem sie die Ziele des Unternehmens unterstützen. Mithilfe eines virtuellen Abbilds jedes Funktionsbausteins und seines eingesetzten Bauteiltyps als individuelles Bauteil (Asset), einem Informationsmodell mit grafischen und nicht-grafischen Darstellungen, wird ein Datensatz erzeugt, der auch für Prüfungen und Audits zur Verfügung steht.

Bei der Definition des Begriffs Asset-Informationsmodell (AIM, entsprechend ISO 19650) steht zunächst nur die generelle Verfügbarkeit der Informationen in der Organisation im Vordergrund. Das Informationsmodell eines Assets ist auch vollständig, wenn die Informationen in Papierform an verschiedenen Standorten verteilt vorgehalten werden. Dies erzeugt einen hohen Aufwand, wenn jemand die Informationen benötigt. Daher sind digitale AIMS von großem Wert, wie in Kapitel 2.2 beschrieben wird.

⁴ vgl. CIGRE TB 787: "ISO series 55000 standards: Implementation and information guidelines for utilities." Kapitel 1.7 "Information Needs for Asset Management"

2 Digitaler Zwilling: Definitionen, Modelle und Standardisierung

2.1 Startpunkt

Die Grundlage intelligenter und digitaler Lösungen sind Informationsmodelle, die aus validen und verknüpften Informationen bestehen, die wiederum von Algorithmen ausgewertet werden können – so genannte Digitale Zwillinge⁵. Bei der Einführung von Digitalen Zwillingen ist eine Dateninventur ähnlich zu Industrie 4.0 (I4.0) unerlässlich. Da sich die Methoden der I4.0 seit Jahren in der Industrie bewähren, gibt es bereits Modelle, Datenstandards und Software, auf die aufgebaut werden kann.⁶

Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass für Neuanlagen die benötigten Informationen gleich bei der Installation bereitgestellt werden können, bei Bestandsanlagen dagegen die Informationsbeschaffung sehr schwierig werden kann. In jedem Fall müssen die Nutzenden die notwendigen Informationen spezifizieren, damit sie auch geliefert werden.

2.2 Digitale Asset-Informationsmodelle

Die Nutzung vollständig digitalisierter Informationsmodelle, die das Prinzip des Single-Source-of-Truth (SSoT) umsetzen und miteinander verlinkt sind, bietet gegenüber verteilten Modellen auf verschiedenen digitalen und analogen Speicherorten folgende Vorteile. Die Informationen

- sind einfacher zu finden und es kann einfacher auf sie zugegriffen werden,
- sind einfacher aktuell zu halten,
- sind einfacher zu analysieren und in Kontext zu setzen,
- können besser genutzt werden, um zeitgerechte informierte Entscheidungen zu treffen,
- haben eine klare Versionierung und Vorgeschichte.

2.3 Digitaler Zwilling

In diesem Kapitel wird der Digitale Zwilling nur kurz eingeführt und zum digitalen Informationsmodell abgegrenzt.

Ein Digitaler Zwilling ist mehr als ein digitales Informationsmodell. Idealerweise wird für jedes mögliche zukünftige Asset eines Netzbetreibers bereits in einem sehr frühen Stadium ein digitales Modell erstellt, welches entsprechend dem Fortschritt der Planung und Ausführung immer weiter mit Detailinformationen angereichert wird. Sobald ein Asset fertiggestellt ist, werden die As-Built-Informationen den Planungsinformationen zugefügt oder ersetzen diese. Während der Betriebs- und Instandhaltungsphase werden Informationen des Digitalen Zwillings laufend aktualisiert und hinzugefügt; dies kann auch Echtzeit-Messwerte aus dem Asset beinhalten.

Analoges gilt für existierende Assets, dass ebenso alle vorhandenen Daten aggregiert und konsolidiert werden. Dies umfasst auch die bereits existenten Daten, welche jedoch aufgrund ihrer historischen Natur erst plausibilisiert und validiert werden müssen. Die Informationen des Digitalen Zwillings dienen als Grundlage für die Implementierung von Asset-Management-Funktionen wie z.B. Predictive Maintenance, die anschließend in den physischen Zwilling zurückgeführt werden.

⁵ VDE Studie Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (2023)

⁶ VDE Studie Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (2023)

2.3.1 Definition nach ISO 30173

Ein Digitaler Zwilling ist die digitale Darstellung einer Zielentität⁷ mit Datenverbindungen, die eine Konvergenz zwischen den physischen und digitalen Zuständen mit einer angemessenen Synchronisationsrate ermöglichen.⁸

2.3.2 Definition Digitaler Zwilling des VDE

Der Digitale Zwilling der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (DZiNE) ist eine virtuelle Repräsentanz eines existierenden oder zu erschaffenden realen Objekts und setzt sich zusammen aus einer identifizierenden Komponente, der Beschreibung seiner Attribute sowie seiner funktionalen Eigenschaften. Er ist mit seinem realen Objekt gekoppelt und begleitet es von der ersten Idee bis zum Recycling (lifecycle Fähigkeit). Diese Kopplung mit dem realen Objekt soll mittels digitaler Kommunikationsinfrastruktur autonom durchgeführt werden, wobei eine manuelle indirekte Kopplung ebenfalls möglich ist.⁹

Anmerkung: In dem zitierten Bericht wurde konsequent von „dem Digitalen Zwilling“ in der Einzahl gesprochen. Da Digitale Zwillinge aber entsprechend verschiedener Use Cases umgesetzt werden sollen, wird in diesem Bericht von der Mehrzahl gesprochen.

Ein idealer DZiNE beinhaltet eine ganzheitliche Datenerfassung (z.B. 3D-Daten, Lieferzeiten, Preise, etc.), in der Praxis auf dem Weg hin zum idealen Zwilling können auch aus Mangel an detaillierten Datenquellen vereinfachte Sichten verwendet werden.

2.3.3 Einordnung der Begriffe

Der Begriff eines „Digitalen Zwillings“ wird in der Literatur und bei Personen teilweise unterschiedlich verwendet, mutmaßlich aufgrund der recht späten Veröffentlichung von ISO 30173 Ende 2023. Zu diesem Zeitpunkt existierten bereits viele weitere Definitionen. Bei der ISO-Definition ist der Begriff stark an den Entstehungszeitpunkt des realen Objekts gekoppelt, was die VDE-Definition nicht direkt vorsieht. Um den vorgesehenen Mehrwert zu generieren, ist es auch nicht notwendig, bestimmten Begrifflichkeiten zu unterliegen. Wichtig ist, dass die Fachexperten die im Kapitel 3 aufgelisteten Aspekte kennen und berücksichtigen, um zu beschreiben, was für einen bestimmten Use Case inhaltlich benötigt wird und technisch umgesetzt werden muss.

Digitale Zwillinge erfassen typischerweise mehrere Domänen und führen diese zusammen, wodurch sie weit über ein reines Simulationsmodell hinausgehen, das von einer kleinen Gruppe von Fachexperten für einen spezifischen Zweck gepflegt werden kann. Entscheidend ist zudem das Verständnis und die klare Definition der Systemgrenzen sowie der Schnittstellen, über die ein Digitaler Zwilling mit seiner Umgebung und unterstützenden Systemen („Enabling Systems“) interagiert.

2.4 Standardisierung als Basis für Interoperabilität

Standardisierung ist die Basis für die Digitalisierung – ohne Standards können (technische) Systeme nicht automatisiert kommunizieren und Informationen können nicht aggregiert werden. Darunter fällt zunächst, dass jedes Gerät durch andere zu identifizieren ist (z.B. Funktion, Position in der Struktur). Standardisierung ermöglicht auch eine inhaltliche Konvergenz, ohne dass aufwändiges Mapping von Strukturen oder Attributen notwendig wird. Unter anderem sollten Referenzarchitektur und Betriebsmittelkennzeichnung, Objektklassen und die semantische Beschreibung in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft vereinheitlicht sein. Auf dieser Basis können anschließend weitere Details wie konkrete Merkmale für verschiedene Objektklassen standardisiert werden.

Es ist zu beachten, dass eine übermäßige Standardisierung Einschränkungen mit sich bringen und die Entwicklung neuer Technologien behindern kann. Insbesondere bei selten umgesetzten Use Cases für digitale Zwillinge mit stark individuellem Charakter sollten ausreichende Freiheitsgrade für die konkrete Ausgestaltung erhalten bleiben.

Bei der Entwicklung von Standards ist es außerdem wichtig, dass die zusammenarbeitenden Parteien gegenseitiges Verständnis haben und bereit sind, Kompromisse einzugehen, vgl. auch Kapitel 5.1.

⁷ Die „Zielentität“ ist in ISO 30173 definiert und kann Software umfassen, so dass der „physische Zustand“ in der DZ-Definition innerhalb der ISO nicht passend ist.

⁸ Übersetzt aus Quelle: ISO IEC 30173 „Digital twin – Concepts and terminology“, identisch auch in „Electropedia“.

⁹ VDE Studie Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (2023).

3 Rundum-Betrachtung von Digitalen Zwillingen

Digitale Zwillinge werden mit sehr unterschiedlichen Use Cases, Sichtweisen und Kontexten in Verbindung gebracht. Das Schlagwort „Digitaler Zwilling“ kann daher ohne weitere Information leicht zu unterschiedlichen Interpretationen führen. Generell ist zu bedenken, dass im Diskussionsfokus nicht die Definition stehen sollte, sondern bei der Identifizierung von Lösungsmöglichkeiten eines Use Cases der Fokus auf den jeweiligen Herausforderungen liegen muss. Kommt es hierbei zu starken Überschneidungen mit den typischen Herausforderungen eines Digitalen Zwillinges sollte man ihn auch als solchen bewerten und in der Projektumsetzung behandeln.

In diesem Kapitel werden verschiedene Aspekte aufgezählt, die unterschiedlich auf Digitale Zwillinge einwirken. Dabei ist kein Aspekt der einzig richtige, sondern für jeden Digitalen Zwilling gelten alle Aspekte in unterschiedlichen Ausprägungen.

3.1 Reifegrad Digitaler Zwillinge

Der Reifegrad, wie im Folgenden beschrieben, bezieht sich auf einen einzelnen Digitalen Zwilling:

1. **deskriptiv:** Informationen zum aktuellen Zustand und der Historie. Enthält ggf. Echtzeitinformationen wie Messwerte, Status, Alarme.
2. **diagnostisch:** Zusätzlich diagnostische Informationen sowie Unterstützung bei Zustandsüberwachung und Fehlerbehebung.
3. **prädiktiv:** Zusätzlich Prognose zukünftiger Zustände, z.B. Gesundheits- und Zustandsindikatoren, verbleibende Nutzungsdauer.
4. **präskriptiv:** Zusätzlich Handlungsempfehlungen auf Basis der Vorhersagen, Bewertung und Optimierung zukünftiger Maßnahmen.
5. **automatisiert:** Zusätzlich Durchführung automatischer Entscheidungen und Maßnahmen, geschlossene Regelkreise, Benutzer überwacht und greift im Normalfall nicht ein.

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden auch häufig die folgenden Begriffe gegeneinander abgegrenzt:

- Digitales Modell oder Digitaler Snapshot: Eine Zusammenstellung der Informationen zu einem Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt, üblicherweise ein Triggerpunkt. Ein digitales Modell hat keine direkte Kopplung zum realen Objekt, sondern wird manuell aktualisiert.
- Digitaler Schatten: Entspricht der Einordnung eines deskriptiven Digitalen Zwillinges wie oben unter 1.
- Digitaler Zwilling (ohne weitere Konkretisierung): Wird im allgemeinen Sprachgebrauch für alle Reifegrade 2-5 verwendet und ist daher sehr unscharf.

In Diskussionen über Digitale Zwillinge ist die Nutzung der fünf Reifegrade sehr hilfreich, da sie sehr präzise ist. Nicht für alle Use Cases von DZiNEs ist der höchste Reifegrad notwendig.

3.2 8 Dimensionen

1. Integrationsbreite	2. Konnektivitätsmodus	3. Aktualisierungsfrequenz	4. CPS-Intelligenz	5. Simulationsfähigkeiten	6. Modellumfang/Modelltiefe	7. Mensch-System-Interaktion	8. Lebenszyklusabdeckung
a. Level 0 Einzelgerät/ Betriebsmittel	a. Level 0 Uni-direktional	a. Level 0 Wöchentlich	a. Level 0 Vom Mensch ausgelöst	a. Level 0 Statisch	a. Level 0 Geometrie & Topologie	a. Level 0 Klassische Interaktion (Smart Devices)	a. Level 0 Planungsphase
b. Level 1 Anlagenebene/ Stationsebene	b. Level 1 Bi-direktional	b. Level 1 Täglich	b. Level 1 Automatisiert (regelbasiert)	b. Level 1 Dynamisch	b. Level 1 Steuer- und Regelverhalten	b. Level 1 Immersive Interaktion (VR/AR)	b. Level 1 Planung + Betrieb
c. Level 2 Netzgebiet/ Netzstufe	c. Level 2 Automatisch/ kontextgesteuert	c. Level 2 Stündlich	c. Level 2 Teilautonom (ggf. KI-gestützt)	c. Level 2 Ad-hoc	c. Level 2 Multiphysikalisches Verhalten	c. Level 2 Multimodale Interaktion	c. Level 2 Vollständiger Lebenszyklus
d. Level 3 Gesamtenergie- system/ Verbundnetz/ Europa		d. Level 3 Echtzeit/ Event-getrieben	d. Level 3 Autonom	d. Level 3 Vorausschauend/ prädiktiv			
Digitaler Zwilling (DZ) – Umfeld & Systemkontext			Verhaltens- und Fähigkeitsprofil des Digitalen Zwillings				Einbettung des DZ in den Lebenszyklus
Lebender Digitaler Zwilling							

Abbildung 1: Übersicht über das 8 Dimensionenmodell von Digitalen Zwillingen, welches die Umgebung, das Verhalten und den Lebenszyklus berücksichtigt. CPS: Cyberphysisches System
 „Angelehnt an Stark, Rainer & Damerau, Thomas (2019): Digital Twin“

Abbildung 1 zeigt die Vielfältigkeit von Digitalen Zwillingen auf und verdeutlicht einmal mehr, warum es so viele unterschiedliche Visionen und Variationen gibt. Das 8-Dimensionen-Modell soll laut der Autoren einen strukturierten Ansatz für die Planung des Umfangs und Typen eines Digitalen Zwillings ermöglichen, indem auch die Umgebung und der Kontext sowie die wahrscheinlich wichtigsten Dimensionen berücksichtigt werden. Dabei ist das Modell nicht vollständig, sondern soll Hinweise geben. Dieses 8 Dimensionen-Modell darf weiterhin nicht als Reifegradmodell missverstanden werden, sondern unterstützt bei der Definition und Entwicklung für die sinnvolle Auswahl adäquater Anforderungen eines Digitalen Zwillings. Für bestimmte Anwendungsfälle reicht die Granularität der unterschiedlichen Dimensionen ggf. nicht aus.

3.3 Kritikalität und Echtzeitfähigkeit

Digitale Zwillinge dienen als Unterstützung in betrieblichen Prozessen. Bei Netzbetreibern gibt es mehrere Hauptanwendungsfälle für eine weitergehende Digitalisierung, die sich vor allem in den Aspekten Echtzeitfähigkeit, Kritikalität und Anzahl der Teilnehmer stark unterscheiden:

1. Systembetrieb

Der Echtzeitbetrieb der Systemführung besitzt aufgrund seiner Kritikalität sehr hohe organisatorische und technische Anforderungen. Die Abwicklung erfolgt über spezialisierte Leitsysteme in einer abgeschlossenen Betriebstechnologie-Umgebung (OT-Umgebung).

2. Asset Management Funktionen

Asset Management Funktionen umfassen u.a. die Instandhaltung vorhandener Anlagen, das Portfolio Management in Zusammenhang mit Entscheidungen zu Ersatz und Neubau sowie die Planung und Realisierung von neuen Anlagen. Die entsprechenden Prozesse werden weitgehend in einer Informationstechnologie-Umgebung (IT-Umgebung) abgewickelt, weil Fehler und Störungen von außen weniger kritisch sind und mehr Personen Zugriff auf die Informationen benötigen als beim Systembetrieb.

3. Erzeugung und Märkte

Die Prozesse der marktlichen Beschaffung von Energie, Leistung und Systemdienstleistungen sind dem Systembetrieb vorgelagert. Hier gibt es eine sehr hohe Anzahl von Teilnehmenden; Abhängigkeiten und Verknüpfungen werden z.B. durch die Kopplung verschiedener Energiesektoren in Zukunft noch weiter steigen. Die Prozesse finden nicht in einer OT-Umgebung statt.

Zeitkritische Prozesse erfordern eine höhere Servicequalität der beteiligten Prozesse und Systeme. Digitale Zwillinge, welche in einen zeitkritischen Prozess integriert werden, dienen als kritische Informations- und Entscheidungsquellen für den operativen Betrieb. Damit müssen diese Systeme fehler-toleranter, hoch-verfügbarer und ausfallsicher (Fail-Operational) betrieben werden. Damit verbunden sind auch höhere vertragliche Anforderungen (Service Level Agreements) von Lieferanten und Service Providern. Diese höheren vertraglichen und technischen Anforderungen erzeugen höhere Kosten sowohl in der Umsetzung als auch während des Betriebes. Eine nachträgliche Anpassung eines nicht-zeitkritischen Digitalen Zwillings zu einem zeitkritischen Digitalen Zwilling ist nicht innerhalb einer einfachen und kleinen Anpassung möglich, sondern erfordert oftmals eine tiefgreifende Veränderung in der Gesamtarchitektur des Digitalen Zwillings. Aus diesem Grund sollte vor der Implementierung von individuellen Digitalen Zwillingen eine Umfeldanalyse durchgeführt werden, um etwaige weitere Use Cases zu identifizieren, welche auf diesen Digitalen Zwilling ebenfalls zugreifen sollen.

Aus Sicherheitsgründen schließen Übertragungsnetzbetreiber eine bidirektionale Kopplung zwischen der gesicherten OT-Umgebung und der weniger sicheren IT-Umgebung zumindest kurz- und mittelfristig aus: Informationen aus der OT-Umgebung können zwar mit direkten technischen Mitteln in die IT-Umgebung gebracht werden, aber von der IT-Umgebung darf nicht in die OT-Umgebung eingegriffen werden. Die OT/IT-Verbindung muss über spezielle Hardware, einer „Cyberdiode“ bzw. „Datendiode“, gesichert sein. Für Netzbetreiber niedrigerer Spannungsebenen kann eine Zusammenführung der Funktionen und Daten aus den Hauptanwendungsfällen Systembetrieb und Asset Management dagegen sinnvoll sein, wenn die Vorteile die Risiken überwiegen.

3.4 Individuelle vs. föderierte Digitale Zwillinge

Das Konzept eines Digitalen Zwillings umfasst sehr breite Anwendungsgebiete sowohl durch den gesamten Produktlebenszyklus als auch durch die unterschiedlichen Ausprägungsformen eines Zwillings. Durch diese Vielfalt existieren bereits zahlreiche Digitale Zwillinge bei den Netzbetreibern, welche teilweise bereits seit Jahrzehnten im Einsatz sind (z.B. GIS-Systeme, SCADA System), aber hauptsächlich zur Optimierung von Prozessen innerhalb einzelner Systeme oder Silos dienen. Aus der Sicht eines Fachexperten ist sein System (z.B. der Transformator) ein abgeschlossenes System und sein Wunsch besteht darin, das interne Modell für darauf bezogene Use Cases zu optimieren und auch den entsprechenden Detailgrad auszuwählen. Übergeordnet betrachtet ist jedoch jedes System ein Sub-System eines anderen Systems (Transformator ist Teil eines Umspannwerkes, Umspannwerk ist Teil eines Netzes). Hier beginnt das Konzept des „föderierten Digitalen Zwillings“¹⁰, das einen Durchbruch durch die Verbindung Digitaler Zwillinge über die gesamte End-to-End-Prozesskette hinweg erzielt, wodurch Medienbrüche beseitigt, robuste Schnittstellen eingerichtet und eine echte Automatisierung über Organisationsgrenzen hinweg ermöglicht werden. Dadurch werden auch zusätzlich Funktionalitäten ermöglicht.

Der Wandel zu föderierten Digitalen Zwillingen ist nicht nur eine technische Verbesserung, sondern auch strategisch entscheidend für Netzbetreiber. End-to-End-Digitale Zwillinge ermöglichen eine ganzheitliche Prozessoptimierung und bieten Transparenz und Resilienz bei der Netzplanung, dem Bau, dem Betrieb und der Wartung. Sie sind für die Energiewende von entscheidender Bedeutung, da sie Szenariosimulationen für den Netzausbau unterstützen und dabei helfen, kritische operative Entscheidungen unter Unsicherheit zu treffen. Über eine einzelne Organisation hinaus können Digitale Zwillinge beispielsweise zur Sektorkopplung oder zu gemeinsamen Netzmodellen verschiedener Netzbetreiber zusammengebracht werden, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Föderierte Digitale Zwillinge erzeugen innerhalb einer Organisation aber auch neue Dimensionen von Komplexität und Herausforderungen sowohl auf technischer aber auch auf organisatorischer und Informations-/Daten-Ebene.

¹⁰ Engl.: Federated Digital Twin

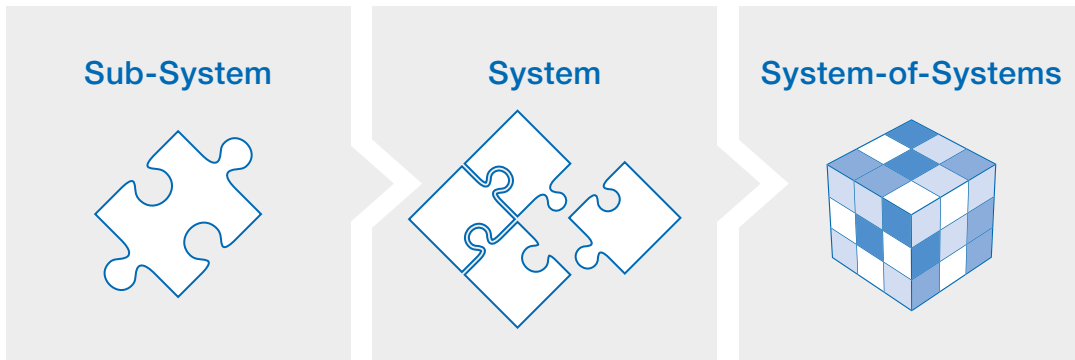


Abbildung 2: Konzeptionelle Darstellung von individuellen Digitalen Zwillingen, welche immer Teil eines übergeordneten Föderierten Digitalen Zwillingen sein sollten. Somit gibt es künftig kaum echte abgeschottete Digitale Zwillinge.

3.5 Vernetzung und Integration

Dieser Aspekt kennzeichnet den Grad an Vernetzung und Integration von einzelnen Digitalen Zwillingen, insbesondere mit der Unterscheidung zwischen unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Digitalen Zwillingen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Methodik und Governance. Je weniger vernetzt und integriert ein Digitaler Zwilling ist, desto höher sind die Freiheitsgrade der Implementierung und die Fokussierung rein auf die funktionalen Anforderungen. Mit steigender Integration steigen auch die externen Interoperabilitätsanforderungen und der Kommunikations- und Kompromissbedarf bei allen beteiligten Organisationen. Damit rücken strukturierte Methoden wie das System Engineering in den Fokus aber auch die Notwendigkeit, gemeinsame Ziele zu definieren und zu verfolgen. Sollte es innerhalb der Unternehmen zu Unstimmigkeiten kommen, braucht es jeweils klare organisatorische Hierarchien, Prozesse und Verantwortliche, welche eine Entscheidung treffen können, ohne das große Ganze aus dem Fokus zu verlieren. Damit bedarf es bei diesen sogenannten System-of-Systems¹¹ Digitalen Zwillingen eine klare übergreifende Kompetenzstruktur, Entscheidungsprozesse und Regelwerke, an die sich alle bestmöglich halten sollten. Erst durch vertragliche Verpflichtungen kann eine stringente Entwicklung erwartet und eingefordert werden. Ein zu lose gekoppeltes System-of-Systems ohne klare vertragliche Grundlagen und definierte Verantwortlichkeiten kann insbesondere bei zeitkritischen Prozessen oder im Fehlerfall zu erheblichen Problemen führen – etwa, wenn eine unternehmensübergreifende Fehleranalyse oder die Offenlegung von Log-Dateien erforderlich ist.

Die Integration verschiedener Systeme in ein Gesamtsystem umfasst unterschiedliche Abstufungen. Abbildung 3 zeigt vier verschiedene Integrationsdistanzen. Zu beachten ist, dass durchgehende Standardisierung und Integration allerdings nicht pauschal positiv sind, sondern noch evaluiert werden sollten:

1. **Individuelle Schnittstellen**
Keinerlei öffentliche Standards verfügbar
2. **Syntaktische Interoperabilität**
Gemeinsame Datenformate und Kodierungsregeln (z.B. XML, JSON, CSV)
3. **Semantische Interoperabilität**
Korrekte Interpretation von Daten durch gemeinsame Bedeutung (Ontologie)
4. **Plug and Play Standard**
Keinerlei Konfiguration notwendig – technische Systeme können direkt kommunizieren

Für föderierte Digitale Zwillinge ist die Integration ein wesentlicher Baustein für die Schaffung von höherwertigeren Funktionen und Services. Die Integrationsdistanz spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Je mehr einzelne Systeme gekoppelt und integriert werden müssen, desto kleiner sollte diese „Distanz“ sein. Insbesondere bei der Installation größerer Hardwaremengen (z.B. Sensoren) ist ein

¹¹ System-of-Systems werden in insbesondere den folgenden drei Standards beschrieben: ISO/IEC/IEEE 21839:2019-07, ISO/IEC/IEEE 21840:2019, ISO/IEC/IEEE 21841:2019

Plug and Play Standard zielführend, weil dadurch der manuelle Konfigurationsaufwand sehr gering wird. Für alle föderierten Digitalen Zwillinge sollte die semantische Interoperabilität im Fokus stehen. Schon heute zeigt sich, dass durch das historisch schnelle Wachstum von Systemen und Domänen unerwünschte Redundanzen oder Abweichungen entstehen, beispielsweise abweichende Definitionen, Bezeichnungen oder mehrfache Speicherung von denselben Informationen, die dann separat gepflegt werden und später voneinander abweichen. Insbesondere für die weitere Datenanalyse und das Datenmanagement stellt dies eine große Herausforderung dar. Werden diese Analysen in Systemen ohne semantische Interoperabilität voll- oder teilautonom integriert, kann das zu Fehlern und im schlimmsten Fall zu Störungen oder Unfällen im Netz führen.

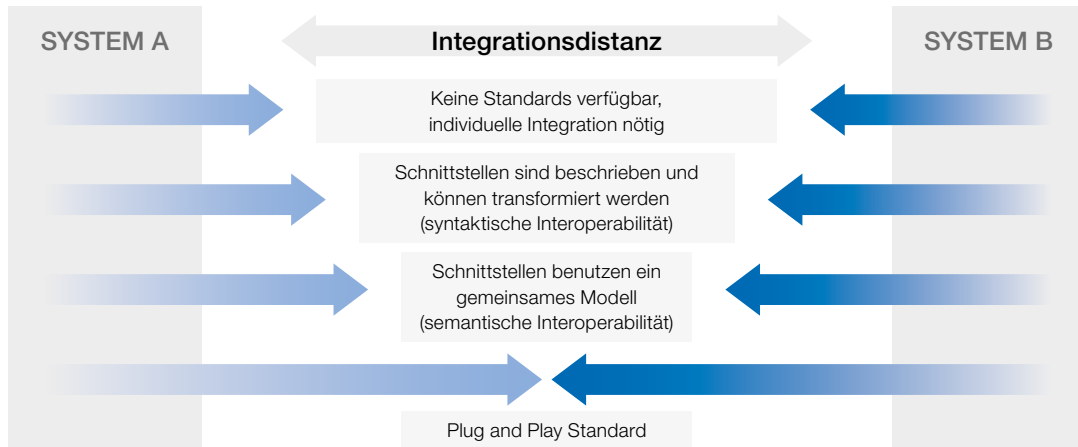


Abbildung 3: Integrationsdistanz in Abhängigkeit der Standardisierung
 Angelehnt an Mathias Uslar: CIM-Workshop: Normung und Lifecycle von CIM

3.6 Einordnung Digitaler Zwillinge im Cyber-Physischen System

Das „Digital Grid“ bringt zusätzliche Funktionen auf die klassische Netzinfrastruktur und dient vorrangig dazu die vorhandene Infrastruktur bestmöglich zu nutzen (z.B. Lastflüsse zeitlich und quantitativ verändern und verschieben). Diese Möglichkeiten erfordern die Einführung neuer Prozesse, neuer Schnittstellen und neuer Technologien. Eine tiefgreifende Analyse dieses Digital Grids wurde von der ENTSO-E im Jahre 2019 durchgeführt und in der [ENTSO-E-Technopedia](#) weitergeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass das Digital Grid im Kern ein sogenanntes Cyber-Physisches System (CPS) ist. Ein CPS ist die Weiterentwicklung eines klassischen Operational-Technology (OT) Systems durch Vernetzung mittels moderner Informationstechnik.

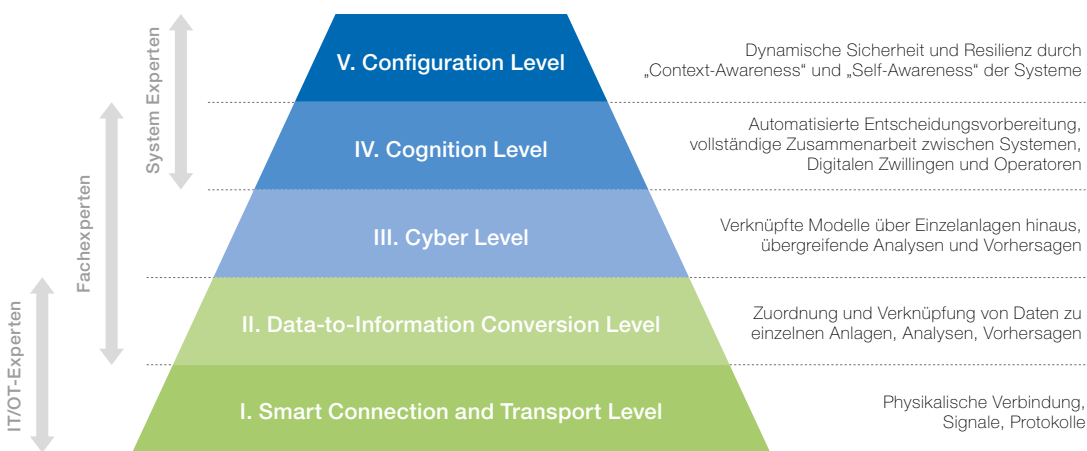


Abbildung 4: Vertikaler Aufbau eines Digital Grids (Cyber-Physisches System) inklusive Beschreibung der einzelnen Level, Themen im Europäischen Kontext und notwendige Fachexperten und Schnittstellen.
 Angelehnt an ENTSO-E

Der vertikale Aufbau eines Digital Grids als CPS entsprechend Abbildung 4 zeigt fünf verschiedene Level und Abhängigkeiten zwischen diesen:

I. **Smart Connection Level**

Jedes Netz besteht aus einer Vielzahl an Systemen und Sensoren. Dieses Level sorgt für die Vernetzung all dieser physischen Objekte und ermöglicht den Transport von Daten. Übertragungsprotokolle sind ebenfalls Teil dieses Levels.

II. **Data-to-Information Conversion Level**

Dieses Level stellt die Verknüpfung verschiedener Daten und die Ableitung von Informationen, z.B. zu konkreten Anlagen, dar. Analysen und Vorhersagen können schon Teil dieses Levels sein, der Fokus liegt jedoch auf Einzelanlagen.

III. **Cyber-Level**

Im Cyber-Level werden Daten und Informationen aus dem vorherigen Level genutzt, um verknüpfte Modelle über die Einzelanlage hinaus zusammenzustellen. In diesem Level können über Ähnlichkeiten zwischen Modellen und umfangreiche Datenanalysen zusätzliche Vorteile genutzt werden, die bei der Betrachtung isolierter Modelle nicht auftreten.

IV. **Cognition Level**

Dieses Level ermöglicht integrierte Analysen und Simulationen über verschiedene Modelle hinweg, um z.B. Entscheidungen vorzubereiten. Dazu kommt die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface, HMI), welche alle Systeme und Digitalen Zwillinge zusammenbringt und darstellt. Auf diesem Level findet eine vollständige Zusammenarbeit zwischen Systemen, Digitalen Zwillingen und Operatoren statt.

V. **Configuration Level**

Im höchsten Level des Digital Grid steigt die Resilienz¹² des Systems maßgeblich. Hierbei ist es notwendig, dass das System eigenständig sowohl die Situation erkennt (Context-Awareness) als auch einen Überblick über die eigenen Systeme, Möglichkeiten und Einschränkungen zur Verfügung hat (Self-Awareness). Langfristige Vision in diesem Level ist die Etablierung von "Dynamischer Sicherheit", welche als wesentliche Unterstützung für autonome Systeme gesehen werden kann, indem ein System die eigene funktionale Sicherheit bewertet und die Leistungsfähigkeit zur Laufzeit selbst optimiert.

Die Umsetzung des Digital Grids bis in das höchste Level erfordert einen interdisziplinären Einsatz und die Kooperationen aller Fachabteilungen innerhalb eines Unternehmens als auch zwischen Unternehmen in der gesamten Energiebranche. Hierfür Bedarf es verschiedenster Rollen, Kompetenzen und Methoden. Abbildung 4 zeigt auf der linken Seite auf, dass für die untersten Levels hauptsächlich IT- und OT-Experten verantwortlich sind. Im Conversion-Level benötigt es zusätzlich Fachexperten, so dass es hier eine Schnittstelle gibt, die bei der Entwicklung von Digitalen Zwillingen maßgeblich zur Qualität beiträgt. Die Fachexperten arbeiten bis auf das Cognition-Level, an dem die Schnittstelle zu den Systemexperten liegt, die eine systemische Denkweise und ganzheitliches Verständnis benötigen.

¹² Resilienz beschreibt die Fähigkeit technischer Systeme, bei Störungen bzw. Teil-Ausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemdienstleistungen aufrechterhalten zu können.

4 Methodischer Wandel als Erfolgsfaktor für Digitale Zwillinge

Föderierte Digitale Zwillinge entstehen nicht dadurch, dass einzelne Organisationen isolierte Modelle aufbauen, sondern indem viele digitale Zwillinge unterschiedlicher Netzbetreiber, Fachbereiche und Technologien bewusst miteinander verbunden werden. Diese Föderation ist anspruchsvoll: Sie verlangt konsistente Informationsmodelle, abgestimmte Systemarchitekturen, gemeinsame Prozesslogiken und klare Schnittstellen.

Damit dieser Verbund funktioniert, müssen Netzbetreiber ihre Denk- und Arbeitsweise verändern – weg von siloartigen Strukturen und dokumentenzentrierter Projektarbeit, hin zu einem modell- bzw. objektbasierten, interdisziplinären und methodisch abgesicherten Vorgehen. Außerdem ist es wichtig anzuerkennen, dass es viele verschiedene Perspektiven auf einzelne Objekte gibt, die jeweils ihre eigene Berechtigung haben und nicht durch andere Perspektiven zu ersetzen sind. Kapitel 5.3 zeigt in einem einfachen Beispiel vier verschiedene Perspektiven auf, die alle parallel notwendig sind.

Zentral für die Weiterentwicklung Digitaler Zwillinge ist ein methodischer Rahmen, der Technik, Organisation und Zusammenarbeit zusammenführt. Die beiden tragenden Elemente dieses Rahmens sind System Engineering (SE) und das Smart Grid Architecture Model (SGAM). Sie bilden gemeinsam die Basis, auf der weitere essenzielle Disziplinen – Systemsicherheit, funktionale Sicherheit, Test- und Qualitätsmanagement – aufsetzen. Erst im Zusammenspiel entfalten sie die Struktur und Stabilität, die föderierte Zwillinge benötigen.

4.1 Neue Denkweise für föderierte Digitale Zwillinge

Föderierte Digitale Zwillinge verbinden lokale Zwillinge zu einem größeren Systemverbund. Das verändert die Denkweise grundlegend:

- Statt Informationen in Dokumenten zu „verstecken“, werden Objekte, Datenflüsse und Funktionen explizit modelliert.
- Statt abteilungsbezogener Optimierung steht ein durchgängiger End-to-End-Blick auf Funktionen und Verantwortlichkeiten im Mittelpunkt.
- Statt punktueller Integrationen entsteht eine bewusst gestaltete Architektur, in der Digitale Zwillinge verschiedener Organisationsteile einfach und automatisiert zusammenwirken und verschiedene Perspektiven ermöglichen.

Diese erweiterte Denkweise ermöglicht es, mehrere Zwillinge über Unternehmens- und sogar Ländergrenzen hinweg zu koppeln – und bildet damit das Fundament für einen pan-europäischen föderierten Digitalen Zwilling wie ihn beispielsweise die ENTSO-E anstrebt, vgl. Kapitel 1.3.6.

4.2 System Engineering und Smart Grid Architecture Model im Zusammenspiel

Das „Smart Grid Architecture Model“¹³ besteht aus fünf (bzw. sechs¹⁴) Schichten, die das (regulatorische) Umfeld, Geschäftsziele und -prozesse, Funktionen, Informationsaustausch und -modelle, Kommunikationsprotokolle und Komponenten darstellen, vgl. Anhang. Jede Schicht deckt die Smart-Grid-Ebene ab, die sich über elektrische Domänen und Informationsmanagementzonen erstreckt. Die Absicht dieses Modells besteht darin, darzustellen, in welchen Zonen des Informationsmanagements Interaktionen zwischen Domänen stattfinden. Es ermöglicht die Darstellung des aktuellen Stands der Implementierungen im Stromnetz, aber darüber hinaus auch die Darstellung der Entwicklung hin zu

¹³ CEN-CENELEC-ETSI „Smart Grid Coordination Group“, November 2012

¹⁴ Im int:net-Projekt wurde das „Business-Layer“ des Original-SGAM aufgeteilt in das organisationsinterne Business-Layer und das externe (aus einer Organisation kaum zu beeinflussende) „Framework-Layer“.

zukünftigen Smart-Grid-Szenarien durch die Unterstützung der Prinzipien Universalität, Lokalisierung, Konsistenz, Flexibilität und Interoperabilität. Wenn das SGAM von allen Beteiligten in einem Austausch verstanden und angewendet wird, werden Klarheit geschaffen und Missverständnisse vermieden, weil allen klar ist, worüber gesprochen wird.

Der Begriff „Systems Engineering“¹⁵ (SE) bezeichnet ein ingenieurwissenschaftliches Fachgebiet sowie einen interdisziplinären Ansatz, um technische Systeme zu entwickeln, zu beschreiben oder zu modellieren, zu simulieren, zu verifizieren und zu testen. Es dient der Definition, dem Aufbau oder der Struktur, der Nachvollziehbarkeit, der Abbildung der Funktionen und vieles mehr von komplexen Systemen oder Produkten.

Systems Engineering und das SGAM haben verschiedene Zielstellungen, greifen aber ineinander wie auch in Tabelle 2 darstellt:

- SGAM definiert die Architekturräume, Ebenen und Beziehungen, in denen Digitale Zwillinge verortet sind.
- SE beschreibt die Methode, wie diese Architektur systematisch entwickelt, gepflegt und über Jahrzehnte weiterentwickelt wird.

Gemeinsam schaffen sie damit Struktur, Nachvollziehbarkeit und Interoperabilität – die drei Grundpfeiler jedes föderierten Ansatzes.

Föderierter Digitaler Zwilling: Anforderung	SGAM	Systems Engineering	Gemeinsam
Struktur & Architekturrahmen	Architektur, Ebenen, Interoperabilitätsräume	–	Gemeinsame Sprache für beteiligte Organisationen
Methodische Entwicklung	–	Anforderungen, Nachverfolgbarkeit, Lebenszyklusmanagement	Gesteuerte Weiterentwicklung über 20+ Jahre
Interoperabilität	Funktions-, Prozess-, Informationssicht	definierte Schnittstellen & Tests	stabiles Zusammenspiel lokal + föderiert
Sicherheit & Qualität	definiert betroffene Ebenen	Sicherheit, Qualitätssicherung, Tests	sichere, geprüfte Föderation
Erweiterbarkeit	modulare Architektur	kontrollierte Änderungsprozesse	langlebige Plattform für neue Teilzwillinge

Tabelle 2: Zusammenhänge zwischen SGAM und Systems Engineering

Diese gegenseitige Ergänzung macht deutlich:

Ein föderierter Digitaler Zwilling entsteht nur, wenn Architektur (SGAM) und Methode (SE) gleichzeitig angewendet werden.

4.2.1 Erweiterter methodischer Werkzeugkasten: Sicherheit, Qualität und Testbarkeit

Systems Engineering und das Smart Grid Architecture Model bilden die Basis für die Entwicklung – aber föderierte Digitale Zwillinge benötigen weitere methodische Säulen für eine erfolgreiche Umsetzung:

- Systemsicherheit & funktionale Sicherheit: Um Fehlerausbreitung und Risiken im Verbund kontrollieren zu können, muss großer Wert auf die funktionale Sicherheit gelegt werden.
- Testmanagement: Einzelne Digitale Zwillinge müssen nicht nur einzeln zuverlässig funktionieren, sondern auch als vernetztes System im Zusammenspiel mit vielen anderen Digitalen Zwillingen.
- Qualitätsmanagement: Es stellt die dauerhafte Stabilität in einer Architektur sicher, die laufend neue Komponenten und Datenströme integriert.

Diese Disziplinen sind kein freiwilliger Zusatznutzen, sondern fundamental wichtig, um das Zusammenwirken zu ermöglichen. In einem Föderationsansatz entscheidet die Sicherheits- und Testfähigkeit

¹⁵ Entsprechend der Definition auf [Wikipedia](https://de.wikipedia.org/wiki/System_Engineering)

darüber, ob neue Zwillinge überhaupt in das Netzwerk aufgenommen werden können. Damit wird Qualität zur Voraussetzung für föderierte Digitale Zwillinge – nicht zu einer nachgelagerten Aufgabe.

4.2.2 Die zentrale Lücke: fehlende Standards für Digitale Zwillinge im Energiesektor

Während andere Industriezweige bereits weitgehend über Standards für komplexe Systeme und Digitale Zwillinge verfügen, existieren in der Energiebranche bislang keine branchenspezifischen europäischen Standards, die technische, wirtschaftliche und regulatorische Anforderungen gemeinsam abdecken.

Besonders kritisch ist, dass neben der Cyber-/IT-Sicherheit die Systemsicherheit und die funktionale Sicherheit (alle drei zusammen repräsentieren die digitale Resilienz) noch nicht ausreichend adressiert sind – obwohl sie für föderierte Digitale Zwillinge essenziell sind, um Fehlerausbreitung und Risiken kontrollierbar zu halten.

4.2.3 Europäischer Lückenschluss als Grundlage für föderierte Digitale Zwillinge

Um Digitale Zwillinge verschiedener Akteure interoperabel zu verbinden, benötigen Netzbetreiber einen gemeinsamen europäischen Rahmen. Dieser sollte insbesondere beinhalten:

- Systems-Engineering-basierte Methoden, speziell für energiewirtschaftliche Digitale Zwillinge,
- eine Integration und ggf. Weiterentwicklung des SGAM,
- harmonisierte Informationsmodelle und Sicherheitsanforderungen,
- sowie abgestimmte Test- und Qualitätsmechanismen.

Erst mit diesem Lückenschluss entstehen die Voraussetzungen für unternehmens- und länderübergreifende Föderationen – und damit für den pan-europäischen Verbund Digitaler Zwillinge.

5 Organisatorischer Wandel als Erfolgsfaktor für Digitale Zwillinge

Ein gemeinsamer europäischer Rahmen schafft die technischen und methodischen Grundlagen – doch erst die organisatorische Transformation insbesondere der Netzbetreiber entscheidet darüber, ob föderierte Digitale Zwillinge in der Praxis funktionieren werden. In diesem Kapitel wird als Ergänzung zum notwendigen methodischen Wandel erläutert, welche weiteren organisatorischen Voraussetzungen es gibt und wie die Implementierung – der „Change“ – gut gelingen kann. Hierzu existiert ein separates Impulspapier aus dem VDE ETG Arbeitskreis, zu finden über die Webseite [Digitalisierung des elektrischen Energiesystems](#).

5.1 Aktive Gestaltung und Zusammenarbeit in der gesamten Kette

Die Umstellung auf vollständige digitale Prozesse und Arbeitsweisen sowohl intern beim Netzbetreiber als auch im Verhältnis mit Anlagenherstellern und Softwareentwicklern ist ein langer und komplexer Prozess¹⁶. Laufende und zukünftige Normungsunternehmungen müssen zu dieser Vision passen: Alle Beteiligten müssen aktiv mitgestalten, etwa über eine Normungsroadmap (vgl. auch Kapitel 2.4). Die Normung entsteht in der Schnittmenge der drei Hauptakteure: Netzbetreiber, Anlagenhersteller und Softwareentwickler (siehe Abbildung 5).

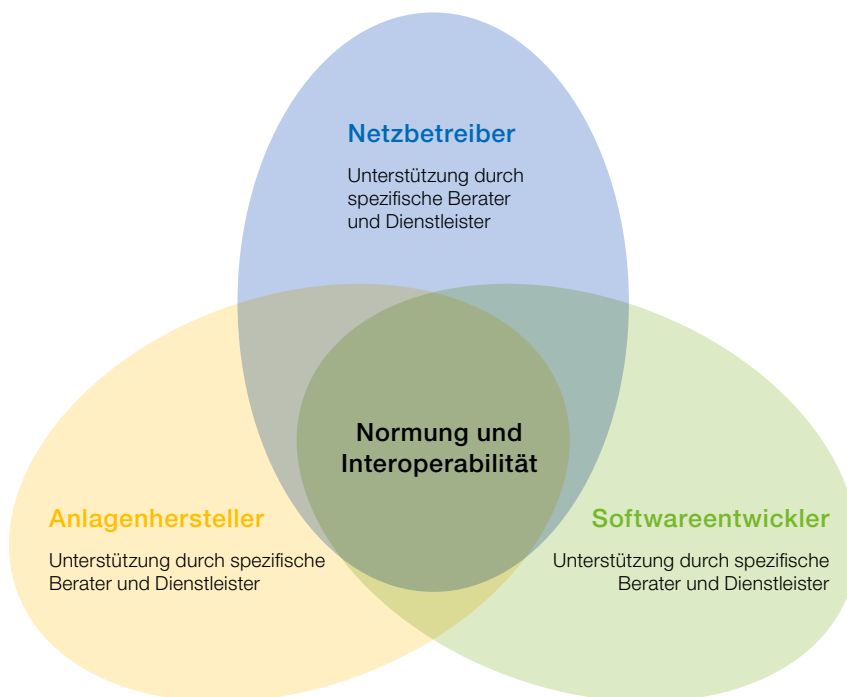


Abbildung 5: Drei Hauptakteure für die Gestaltung Digitaler Zwillinge

Netzbetreiber müssen die digitale Transformation ganzheitlich angehen und Systeme wie Digitale Zwillinge Stück für Stück mit Prozessen und Mitarbeitenden weiterentwickeln. Dies steht auch im Einklang mit den aktuellen Bestrebungen der ENTSO-E und E.DSO, die sich 2023 auf einen gemeinsamen Impuls zum Thema Digitaler Zwilling geeinigt haben.¹⁷ Eine zentrale Frage für Netzbetreiber ist, ob sich durch Digitale Zwillinge etwas Fundamentales ändern wird. In anderen Abschnitten dieses Berichts werden die Notwendigkeit der Organisationsentwicklung, eines Kulturwandels sowie der Veränderung

¹⁶ VDE DZINE, S. 5 schlägt vor, innerhalb des eigenen Unternehmens zunächst die Erstellung eines Migrationspfades vorzunehmen sowie vorerst mit einem begrenzten Anwendungsfall bei gleichzeitiger Befähigung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter durch geeignete Schulungsmaßnahmen zu starten.

¹⁷ VDE DZINE, S. 6; parallele Arbeitsgruppen z.B. bei ENTSO-E wie in Kapitel 1.3.3 gelistet schlagen ähnliches vor, entsprechende Berichte bei Veröffentlichung dieses Berichts in Vorbereitung

der internen Systementwicklung und Projektmethodiken erläutert. Für Netzbetreiber stellt sich die Frage, welche neuen Fähigkeiten sie intern aufbauen müssen und welche davon am Markt z.B. durch Berater beschafft werden können.

Generell lässt sich festhalten, dass sich Netzbetreiber vom klassischen Netzbetrieb in Richtung Systementwickler eines Sozio-Technischen Systems transformieren. Durch die steigende Digitalisierung entsteht die Notwendigkeit einer starken Systemintegration und die holistische Betrachtung der gesamten Prozess- und Systemkette. Systemintegration erfordert Interoperabilität vieler Akteure und Stakeholder, um am Ende Prozesse, Daten und Systeme miteinander zu verbinden und zu vernetzen. Insbesondere das systemische Know-How, vgl. Kapitel 3.6, werden Netzbetreiber nur schwer auslagern können, sondern sollten ihre Kernprozesse und Herausforderungen proaktiv digitaler gestalten. Damit einher müssen sie ihr Gesamtsystem als Digital Grid weiterentwickeln und alle Prozess- und Technikabhängigkeiten berücksichtigen.

Um die Versorgungssicherheit weiter in der heutigen Qualität aufrecht zu erhalten, ist eine starke Zusammenarbeit zwischen den Hauptakteuren notwendig. Hierbei muss folglich der Netzbetreiber, ggf. unterstützt durch fachkundige Berater, als Systemintegrator auftreten und Schnittstellen, Standards und Qualitätskriterien vorgeben. Hersteller und Softwareentwickler fungieren als wichtige strategische Partner für die Umsetzung und die Weiterentwicklung der digitalen Möglichkeiten. Abbildung 5 stellt vereinfacht dar, wie die Kompetenzen der drei Hauptakteure zusammenwirken sollten.

5.2 Erfolgsfaktoren und Hindernisse in der eigenen Organisation

In Abbildung 6 sind einige generische Erfolgsfaktoren und dazu passende Hindernisse aufgelistet, die die Einführung von Digitalen Zwillingen betreffen.

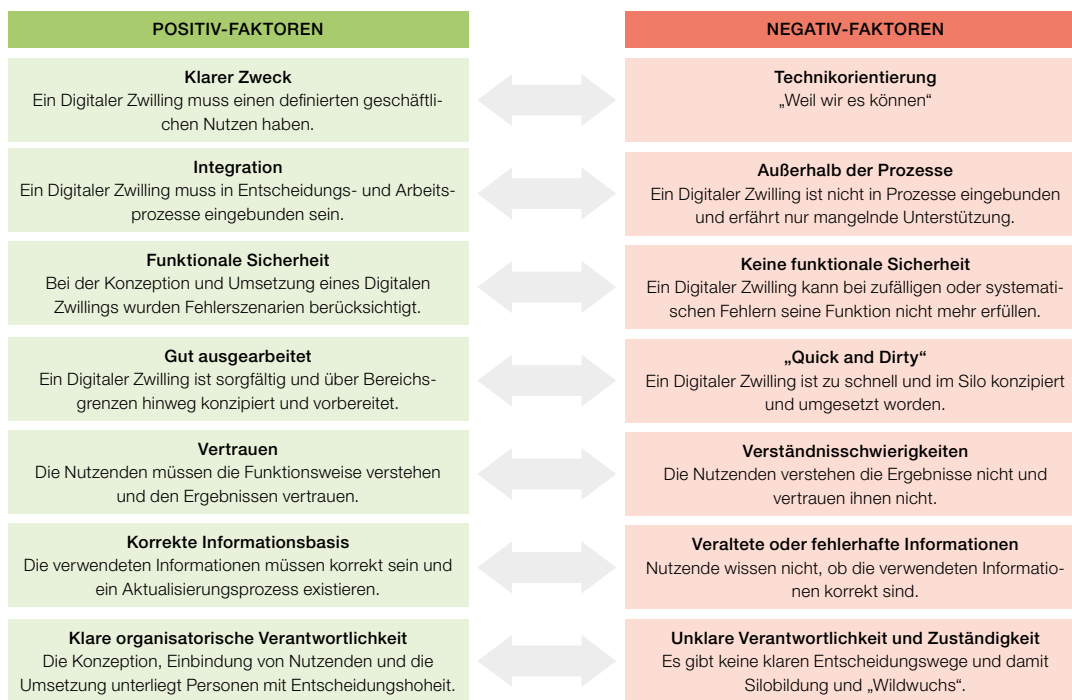


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Erfolgsfaktoren und Hindernissen bei der Einführung Digitaler Zwillinge in einer Organisation

5.3 Organisationsüberblick Digitaler Zwilling bei Netzbetreibern

In den letzten Jahrzehnten wurde der Fokus stark auf die Optimierung einzelner Prozessschritte oder Systeme gelegt. Dieses Optimierungspotenzial ist weitgehend erschöpft und erfordert hohe Aufwände mit kleinen Effizienzsteigerungen. Viel größer hingegen sind die domänenübergreifenden Potenziale, welche durch eine Betrachtung der End-To-End-Prozesse aufkommen und identifiziert werden. Um die Potentiale zu nutzen, sollten entsprechende föderierte Digitale Zwillinge umgesetzt werden, vgl. Kapitel 3.4.

Zur Erläuterung wird hier ein Netzbetreiber betrachtet, welcher entsprechend Abbildung 7 vereinfacht aus nur vier Bereichen besteht:

- Asset für Planung, Bau und Instandhaltung von Umspannwerken und Leitungen
- System für Systementwicklung und Systembetrieb
- Finanzen für Beschaffung und Controlling
- Management für die strategische und operative Steuerung des Unternehmens

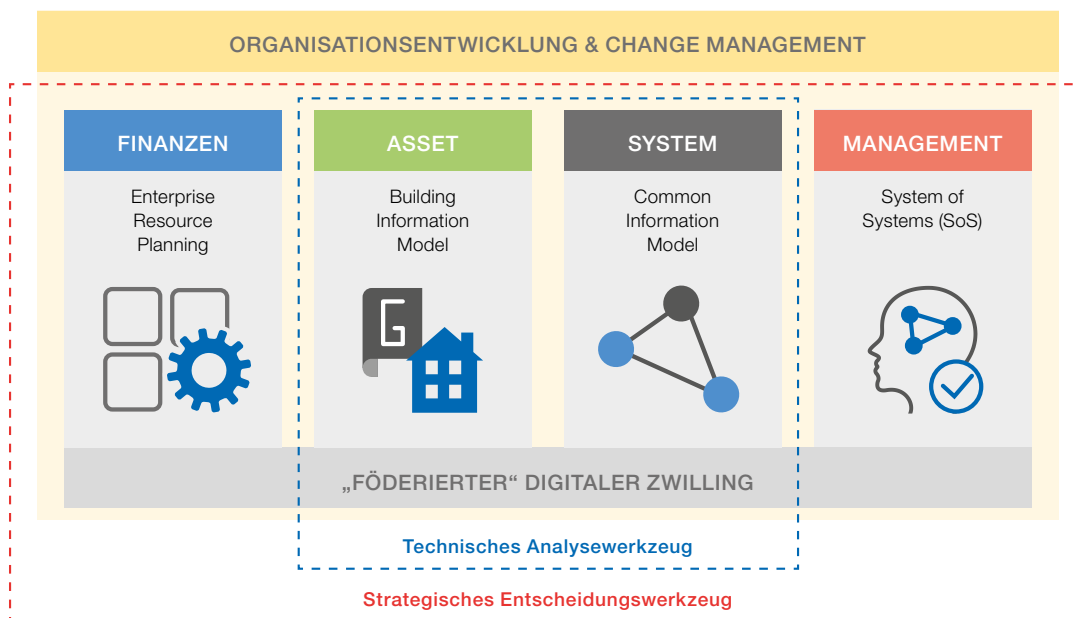


Abbildung 7: Organisationsentwicklung: Föderierter Digitaler Zwilling in einer Organisation

Alle diese Bereiche verfügen über etablierte Prozesse, sind verantwortlich für bereichsübergreifende Abläufe und setzen bereits Digitale Zwillinge ein:

- Im **Asset Bereich** spielen das Asset Information Model aufbauend auf dem Asset Tree mit zugehörigen Technischen Anlagendaten sowie verlinkten Informationen in Geoinformationssystemen sowie Dokumentenmanagementsystemen eine zentrale Rolle. Die Anwendung der BIM-Methodik ergänzt hier zukünftig die Integration von weiteren Informationen und den Link zum 3D-Modell. Für den standardisierten Datenaustausch zwischen Netzbetreibern und Herstellern sind eine Klassifizierung nach IEC 81346 sowie Standards für Asset-Eigenschaften je Klasse erforderlich.
- Für den **System Bereich** ist es das Common Information Model (CIM) zentral.

Für die Integration von Asset und System müssen die Klassifizierungen und Schlüsseldaten aufeinander abgestimmt sein, vgl. Kapitel 2.4.

Zusätzlich gibt es zwei von den Hauptaufgaben des Netzbetreibers getrennte Bereiche, die sehr stark nach innen im Unternehmen wirken:

- Der **Finanzbereich** betreibt das Enterprise-Resource-Planning (ERP).
- Das **Management** hat zwar „klassisch“ noch keinen aktiven Digitalen Zwilling, wird jedoch langfristig Informationen und Entscheidungen auf Grundlage des föderierten Digitalen Zwillings treffen und somit zu einem der wichtigsten Stakeholder.

Durch Vernetzung der Bereiche und Prozesse innerhalb eines Unternehmens wird die „End-To-End-Ausrichtung“ stärker betrachtet und dabei werden System- und Medienbrüche deutlich sichtbar. Für die Automatisierung müssen diese Brüche mittels Schnittstellen, Systemintegration oder Konsolidie-

zung aufgelöst werden. Ein Netz aus Schlüsselattributen für die Verlinkung von Informationen aus den verschiedenen Digitalen Zwillingen ist zu entwickeln, bestenfalls sind diese mit Standard-Auswahllisten zu hinterlegen.

Hierbei entstehen innerhalb der Organisation schnell zentrale Fragen zur Governance:

- Wer ist für was verantwortlich?
- Wer darf welche Entscheidungen treffen?
- Wer muss die Kosten tragen?
- In welchem System werden welche Funktionalitäten umgesetzt?
- Wer muss die Daten pflegen?

Diese Fragen können nicht von Projektleitern in konkreten Umsetzungsprojekten zu Digitalen Zwillingen gelöst werden, dürfen aber auch nicht unbehandelt bleiben. Das Management muss sich seiner Rolle bewusst sein und frühzeitig dem Thema föderierte Digitale Zwillinge widmen. Die reine Beauftragung zur technischen Umsetzung führt häufig zum Scheitern. Sie verursacht nicht nur erhebliche Reibungsverluste in Umsetzung und operativem Betrieb, sondern schafft auch technologische Schulden, die später im laufenden Betrieb mühsam abgebaut werden müssen. Im schlimmsten Fall hat dies eine Wiederholung des gesamten Umsetzungsprojekts zur Folge.

6 Ausblick

Das Potential Digitaler Zwillinge für die zukünftige Elektrizitätsversorgung ist enorm. Bis dieses Potential allerdings in hohem Maße genutzt werden kann, sind noch deutliche Weiterentwicklungen auf vielen Ebenen notwendig. Dieser Bericht bietet einen Einstieg in die Thematik.

Der Arbeitskreis ist weiterhin in der VDE ETG aktiv, aktuelle Informationen sind über die Webseite [Digitalisierung des elektrischen Energiesystems](#) zu finden. Insbesondere soll die Vernetzung mit anderen Arbeitsgruppen, Gremien und Verbänden intensiviert werden, beispielsweise über die Mitwirkung in mehreren Arbeitsgruppen durch Mitglieder in Personalunion.

Standardisierung ist die Basis für die Entwicklung und Umsetzung Digitaler Zwillinge: sie beginnt beim gemeinsamen Verständnis der Begrifflichkeiten und Anwendungsfälle und führt langfristig zu interoperablen Lösungen verschiedener Anbieter. Standardisierungsaktivitäten müssen daher auf verschiedenen Ebenen weitergeführt werden.

Gleichzeitig ist klar, dass es keine einzige Lösung für alle Fälle geben wird: unterschiedliche Lösungen mit jeweiligen Stärken werden sich für verschiedene Anwendungsfälle etablieren. Dennoch sollen aufgrund der dahinter liegenden Standardisierung Unternehmen aus den drei Hauptakteursgruppen – Netzbetreiber, Anlagenhersteller und Softwareentwickler – frei zusammenkommen können.

Der Austausch über Umsetzungsbeispiele und das gegenseitige Lernen können allen Beteiligten helfen, Digitale Zwillinge zügig weiterzuentwickeln und in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft zu etablieren.

7 Anhang: Smart Grid Architecture Model

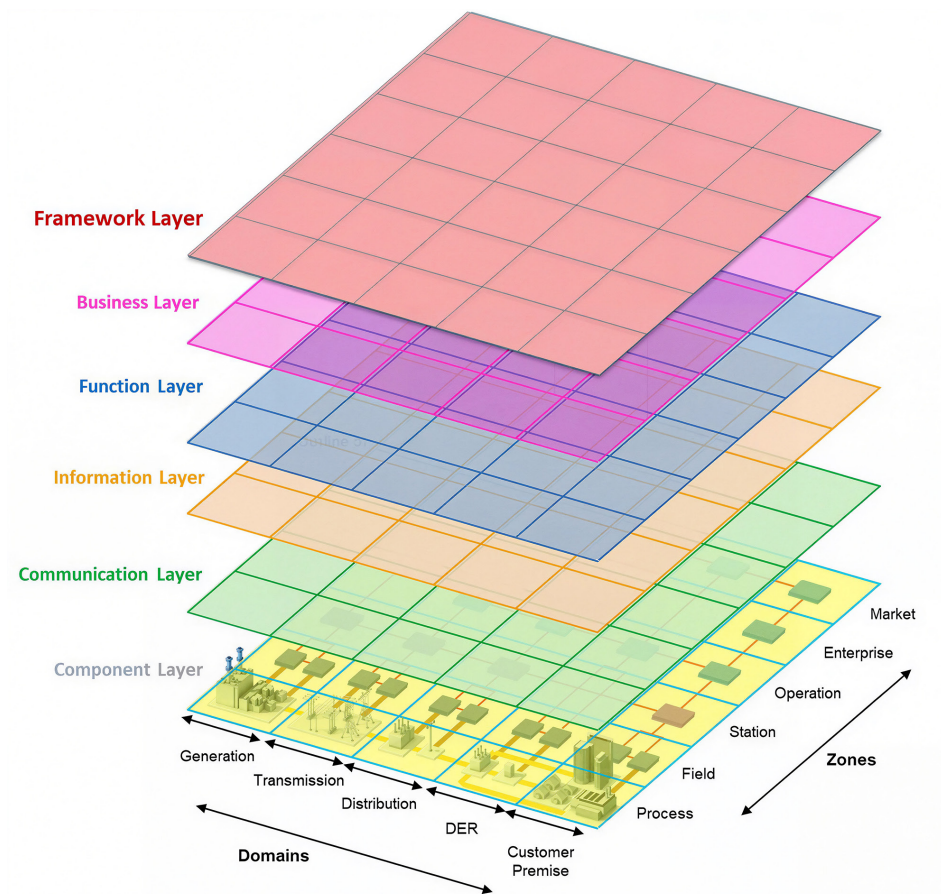


Abbildung 8: Smart Grid Architecture Model (SGAM) aus dem int:net-Projekt, © B.A.U.M

Das Smart Grid Architecture Model (SGAM) besteht aus 5 vertikalen Schichten. Die SGAM-Geschäftsschicht deckt in diesem Modell regulatorische Aspekte hinsichtlich der Machbarkeit von Geschäftsfällen für Lösungen ab, die auf den SGAM-Ebenen 1 bis 4 beschrieben sind. Diese 5. Ebene deckt jedoch nicht die politische oder regulatorische und überhaupt nicht die gesellschaftliche Zusammenarbeit in umfassenden Systemen ab. Daher schlägt das int:net-Projekt die Ergänzung und Definition einer 6. SGAM-Schicht vor.

In diesem Bericht werden im Folgenden die Beschreibungen der 6 Schichten nach diesem Vorschlag aufgelistet.

Rahmen- und Regulatorikschicht (Framework Layer)

Sie umfasst die Interoperabilität einer Vielzahl von Interessengruppen. Dazu gehören politische Entscheidungsträger und Behörden von der nationalen bis zur kommunalen Ebene, Regierungsbehörden, Normungsorganisationen (national und international), Versorger- und Verbraucherverbände sowie Forschungs-, Innovations- und andere Förderprogramme (national, transnational, international)¹⁸.

Geschäftsschicht (Business Layer)

Die Geschäftsschicht repräsentiert die geschäftliche Sichtweise auf den Informationsaustausch im Zusammenhang mit Smart Grids. Die oberen beiden SGAM-Schichten können verwendet werden,

¹⁸ Im int:net-Projekt wurden Methoden zur Verbesserung und Förderung der Koordination und Zusammenarbeit als Erfolgsfaktor für die Interoperabilität entwickelt. Es wurde dabei auch diskutiert, dass eine solche neue Interoperabilitätsschicht besonders relevant wird, wenn es um sektorübergreifende Architekturmodelle geht. Sie würde es dann erlauben, Politik und Regulierung über Sektorengrenzen hinweg zu beschreiben, zu verbinden und aufeinander abzustimmen. Weitere Informationen dazu finden sich im „Whitebook on engagement towards interoperability in governance“.

um regulatorische und wirtschaftliche (Markt-)Strukturen und -Richtlinien (siehe „Regulatorikschicht“) sowie Geschäftsmodelle und Geschäftsportfolios (Produkte und Dienstleistungen) der beteiligten Marktteilnehmer abzubilden. In der Geschäftsschicht können Geschäftsfähigkeiten und Geschäftsprozesse dargestellt werden. Das unterstützt Führungskräfte bei der Entscheidungsfindung in Bezug auf (neue) Geschäftsmodelle und spezifische Geschäftsprojekte (Business Case) sowie Regulierungsbehörden bei der Definition neuer Marktmodelle.

Funktionsschicht (Function Layer)

Die Funktionsschicht beschreibt Funktionen und Dienste einschließlich ihrer Beziehungen aus architektonischer Sicht. Die Funktionen werden unabhängig von Akteuren und physischen Implementierungen in Anwendungen, Systemen und Komponenten dargestellt. Die Funktionen werden durch Extraktion der von den Akteuren unabhängigen Anwendungsfallfunktionalität abgeleitet.

Informationsschicht (Information Layer)

Die Informationsschicht beschreibt die Informationen, die zwischen Funktionen, Diensten und Komponenten verwendet und ausgetauscht werden. Sie enthält Informationsobjekte und die zugrunde liegenden kanonischen Datenmodelle. Diese Informationsobjekte und kanonischen Datenmodelle stellen die gemeinsame Semantik für Funktionen und Dienste dar, um einen interoperablen Informationsaustausch über Kommunikationsmittel zu ermöglichen.

Kommunikationsschicht (Communication Layer)

Der Schwerpunkt der Kommunikationsschicht liegt auf der Beschreibung von Protokollen und Mechanismen für den interoperablen Austausch von Informationen zwischen Komponenten im Kontext des zugrunde liegenden Anwendungsfalls, der Funktion oder des Dienstes und der zugehörigen Informationsobjekte oder Datenmodelle.

Komponentenebene (Component Layer)

Der Schwerpunkt der Komponentenebene liegt auf der physischen Verteilung aller beteiligten Komponenten im Smart-Grid-Kontext. Dazu gehören Systemakteure, Anwendungen, Energieversorgungsanlagen (in der Regel auf Prozess- und Feldebene), Schutz- und Fernsteuerungsgeräte, Netzwerkinfrastruktur (kabelgebundene/kabellose Kommunikationsverbindungen, Router, Switches, Server) und alle Arten von Computern.

Über die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG)

Die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) bündelt mit über 9.000 Mitglieder die Fachkompetenz der Energietechnik von der Erzeugung, Übertragung, Verteilung bis hin zu den vielfältigen Anwendungsfeldern. Das umfangreiche Expert*innenwissen der rund 300 ehrenamtlichen Mitarbeiter*innen aus Industrie, Forschung, Versorgungsunternehmen, Hochschulen und Behörden, die in Fachbereichen, Fachausschüssen und Arbeitskreisen mitwirken, bildet die technisch-wissenschaftliche Basis für Veranstaltungen und Publikationen der Energietechnischen Gesellschaft im VDE.

Mehr Informationen unter <https://www.vde.com/etg>

Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 130 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeiter*innen an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expert*innen und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch.

Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Sitz des VDE (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V.) ist Frankfurt am Main. Mehr Informationen unter www.vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com

VDE