

Industrielle Datenräume als Basis für Wettbewerbsfähigkeit im Maschinen- und Anlagenbau

Datenräume als Grundlage für
digitale Geschäftsmodelle und Industrial AI





ADVANCING EUROPE'S
MACHINERY INDUSTRY

Industrielle Datenräume als Basis für Wettbewerbsfähigkeit im Maschinen- und Anlagenbau

Datenräume als Grundlage für
digitale Geschäftsmodelle und Industrial AI

Autoren:

Salome Peters, Etienne Axmann, Dr. Lukas Sohlbach, Dr. Marc Hüske, Jan Fischer

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	7
1. Ausgangslage und industrieller Wandel	9
1.1 Externe Treiber des Wandels	9
1.2 Strukturelle Herausforderungen in Europa	10
1.3 Auf dem Weg zur europäischen Datenökonomie	10
1.4 Konsequenzen für den Maschinen- und Anlagenbau	10
1.5 Ausgangspunkt für Manufacturing-X	11
2. Grundlagen und Wirkmechanismen industrieller Datenräume	12
2.1 Datensouveränität als Grundprinzip	12
2.2 Interoperabilität: Die Voraussetzung für Skalierung	12
2.3 Sichere Kollaboration über Unternehmensgrenzen hinweg	13
2.4 Datenbasierte Produkte und die Wertlogik im Datenraum	13
2.5 Architekturbausteine und Funktionslogik	13
2.6 Datenräume als Ausgangspunkt für neue Wertschöpfungsstrukturen	13
3. Strategische Relevanz für Entscheider	15
3.2 Grundlegende neue Infrastrukturen lösen neue Innovationen aus	15
3.3 Warten ist keine Strategie	15
3.4 Der Nutzen entsteht durch multilaterales Teilen	16
3.5 Strategische Handlungsimplikationen	16
4. Digitale Produkte und Services im Datenraum – betriebswirtschaftlicher Nutzen und Geschäftsmodelle	17
4.1 Digitale Produkte und Services im Datenökosystem	17
4.2 Von digitalen Services zu skalierbaren Geschäftsmodellen	19
4.2.1 Vom digitalen Feature zur marktfähigen Wertschöpfung	19
4.2.2 Von der Geschäftsmodellinnovation zur ökonomischen Systemwirkung	20

4.3	Ökonomische Wirkmechanismen datenraumbasierter Geschäftsmodelle	20
4.4	After-Sales-Service als datenraumbasiertes, integriertes Wertschöpfungsszenario	20
4.5	Datenräume als Grundlage skalierbarer Geschäftsmodelle	22
5.	Architekturvarianten, Anwendungsszenarien & Einordnung in Initiativen	23
5.1	Industrial Data Spaces (IDS) und International Data Space Association (IDSA)	23
5.2	Gaia-X, Gaia-X AISBL und Eclipse Foundation	24
5.3	Catena-X, Catena-X e.V. und Tractus-X	26
5.4	Common European Data Spaces und Data Space Support Center (DSSC)	27
5.5	Manufacturing-X, Factory-X und MX-Port	28
5.6	Einordnung zentraler Entwicklungen und Zusammenhänge im Datenraum-Kontext	30
6.	Technische Grundlagen industrieller Datenräume	31
6.1	Identitäten	31
6.1.1	Nutzeridentitäten isoliert, zentral und föderiert	31
6.1.2	Organisationsidentität, dezentral und selbstsouverän	33
6.2	Konnektoren	33
6.3	Föderationsdienste	37
6.4	Observability Services	37
7.	Organisation und Governance in unternehmensübergreifenden Datenräumen	39
7.1	Föderation statt Zentralisierung	39
7.2	Governance als Vertrauensmechanismus: Regeln, Policies und Kontrollmechanismen	39
7.3	Rollen und Verantwortlichkeiten im Datenraum-Ökosystem	40
7.4	Onboarding, Betrieb und Eskalation: Governance im Tagesgeschäft	40

7.5 Interoperabilität als Governance-Aufgabe: Standardisierung ist nicht optional	41
7.6 Anreizsysteme und Wertlogik: Warum Unternehmen mitmachen (oder nicht)	41
7.7 Manufacturing-X als Koordinationsrahmen: Governance über mehrere Projekte hinweg	41
7.8 Fazit: Governance entscheidet über Skalierung	41
8. Rechtliche Grundlagen	42
8.1 Regulatorischer Rahmen der EU	42
8.1.1 Data Governance Act (DGA): Vertrauensinfrastruktur für Datenräume	42
8.1.2 EU-Datenverordnung (Data Act): Rechte und Pflichten im industriellen Datenaustausch	42
8.1.3 Datenschutz im Kontext industrieller Datenräume	43
8.1.4 Kartell- und wettbewerbsrechtliche Leitplanken	43
8.1.5 Operative Compliance-Anforderungen für Unternehmen	43
9. Skalierung industrieller Datenräume und ihre Rolle für Industrial AI	44
9.1 Erfolgsfaktoren für die Skalierung industrieller Datenräume	44
9.2 Von Pilotprojekten zu produktiven Ökosystemen	45
9.3 Datenräume als Fundament für Industrial AI	45
9.4 Skalierung von Industrial AI über Unternehmensgrenzen hinweg	45
9.5 Strategische Bedeutung für Unternehmen	45
10. Abkürzungsverzeichnis	46
11. Glossar	48
12. Literatur- und Quellenverzeichnis	50

Executive Summary

Der Maschinen- und Anlagenbau steht vor einem strukturellen Wendepunkt. Markt- und Technologiezyklen verkürzen sich, der internationale Wettbewerbsdruck nimmt zu, und neue regulatorische Rahmenbedingungen verändern die Spielregeln industrieller Wertschöpfung. Gleichzeitig stoßen klassische Digitalisierungsansätze, geprägt von Insellösungen, proprietären Plattformen und punktuellen IT-Projekten, zunehmend an ihre Grenzen. Produktivität, Innovationsfähigkeit und Skalierbarkeit lassen sich damit nicht mehr in dem Maße steigern, wie es für eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit erforderlich ist.

In diesem Kontext gewinnen industrielle Datenräume eine strategische Bedeutung. Sie sind kein Selbstzweck und kein weiteres IT-System, sondern eine Basisinfrastruktur für unternehmensübergreifende, datenbasierte Wertschöpfung. Datenräume ermöglichen es Unternehmen, Daten sicher, souverän und interoperabel über Unternehmensgrenzen hinweg zu teilen, ohne die Kontrolle über ihre Daten aufzugeben. Sie bilden damit die strukturelle Voraussetzung, um Effizienzpotenziale zu heben, neue digitale Produkte und Services zu entwickeln und datenbasierte Geschäftsmodelle zu skalieren.

Warum Datenräume jetzt relevant werden

Mehrere Entwicklungen wirken gleichzeitig auf den Maschinen- und Anlagenbau ein. Digitale Plattformunternehmen – insbesondere große Hyperscaler – setzen zunehmend Standards für datengetriebene Geschäftsmodelle und verschieben Wertschöpfung vom physischen Produkt hin zu Software und Services. Gleichzeitig schafft die europäische Datenstrategie mit Instrumenten wie Data Act (DA), Data Governance Act (DGA), AI Act und Digitalem Produktpass einen neuen Ordnungsrahmen für Datennutzung, Interoperabilität und Datensouveränität. Unternehmen müssen künftig nicht nur Daten teilen können, sondern dies auch regelkonform, nachvollziehbar und auditierbar tun.

Datenräume adressieren diese Anforderungen systemisch. Sie verbinden technische Interoperabilität mit Governance-Mechanismen, rechtlicher Absicherung und organisatorischer Klarheit. Damit unterscheiden sie sich fundamental von proprietären Plattformlösungen: Daten verbleiben bei den Unternehmen, werden nur

unter Einhaltung von Nutzungsrechten kontrolliert weitergegeben, und Kooperation erfolgt auf Basis gemeinsamer Regeln statt einseitiger Abhängigkeiten.

Datenräume als strategische Basisinfrastruktur

Strategisch betrachtet sind Datenräume mit klassischen Infrastrukturen vergleichbar. So wie Verkehrs- oder Kommunikationsinfrastrukturen erst neue Märkte und Geschäftsmodelle ermöglichten, schaffen Datenräume die Grundlage für eine neue Phase industrieller Digitalisierung. Entscheidend ist dabei nicht der einzelne Use Case, sondern die Fähigkeit, unternehmensübergreifend zu skalieren.

Der Nutzen eines Datenraums wächst mit der Anzahl der Teilnehmer und der Dichte der ausgetauschten Informationen. Der eigentliche Mehrwert ergibt sich durch multilaterale Zusammenarbeit entlang ganzer Wertschöpfungsketten. Lieferketten werden transparenter und resilienter, Serviceprozesse vorausschauend, und neue Formen kooperativer Wertschöpfung werden möglich.

Für Entscheider bedeutet das: Der Einstieg in Datenräume ist keine rein technische Entscheidung, sondern eine Ökosystem- und Positionierungsentscheidung. Wer frühzeitig teilnimmt, kann Standards mitgestalten, Partnernetzwerke aufbauen und sich strategisch im entstehenden Datenökosystem positionieren. Abwarten führt dagegen zu Abhängigkeiten von fremdgesetzten Regeln und weniger Gestaltungsmacht.

Wirtschaftlicher Nutzen und Geschäftsmodelle

Der betriebswirtschaftliche Nutzen von Datenräumen entsteht nicht durch den Datenaustausch an sich, sondern durch datenbasierte Produkte und Services, die auf dieser Infrastruktur aufbauen. Im Maschinen- und Anlagenbau reichen diese von Zustandsüberwachung, Predictive Maintenance und Remote Support über Performance- und Energie-Services bis hin zu digitalen Zwillingen und datenbasiertem Lifecycle-Management.

Erst durch die systematische Bündelung solcher digitalen Funktionen zu klaren Leistungsversprechen entstehen skalierbare Geschäftsmodelle, etwa Subskriptionsmodelle, nutzungs- oder leistungsabhängige Vergütung oder servicebasierte Erlösmodelle. Datenräume senken dabei Koordinations- und Transaktionskosten, erhöhen Transparenz und schaffen Skaleneffekte. Netzwerkeffekte sorgen dafür, dass mit wachsender Teilnehmerzahl auch der wirtschaftliche Nutzen steigt.

Besonders deutlich wird dies am Beispiel des After-Sales-Service. Durch datenraumbasierte Vernetzung von Maschinenherstellern, Komponentenlieferanten, Servicepartnern und Betreibern lassen sich Stillstände reduzieren, Wartung planbarer gestalten und Serviceumsätze skalieren – bei gleichzeitiger Wahrung der Datensouveränität aller Beteiligten.

Technik, Governance und Recht als Enabler

Industrielle Datenräume funktionieren nur im Zusammenspiel von Technik, Organisation und Recht. Technisch bilden Identitäten, Konnektoren und Föderationsdienste das Rückgrat. Sie ermöglichen sichere Identifikation, kontrollierte Aushandlung von Nutzungsrechten und interoperablen Datentransfer.

Organisation und Governance sind dabei kein „Overhead“, sondern Voraussetzung für Skalierung. Klare Rollen, verbindliche Regeln, standardisierte Onboarding-Prozesse und funktionierende Konflikt-Beilegungs-Mechanismen schaffen Vertrauen und Planbarkeit im Ökosystem. Gleichzeitig verhindern föderierte Strukturen die Entstehung neuer zentraler Machtpositionen.

Rechtlich schaffen europäische Regelwerke wie Data Act, DGA, Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) und Kartellrecht klare Leitplanken. Unternehmen müssen Datennutzung, Datenschutz und Wettbewerbsrecht integriert betrachten und technisch wie organisatorisch umsetzen. Frühzeitige Compliance-Integration reduziert Risiken und erhöht die Akzeptanz datenbasierter Kooperation.

Datenräume als Grundlage für Industrial AI

Mit zunehmender Reife industrieller KI-Anwendungen wird deutlich: Performante Industrial AI ist vor allem ein Datenproblem. KI-Modelle benötigen nicht nur große Datenmengen, sondern vor allem qualitativ hochwertige, kontextualisierte, standardisierte und rechtssicher nutzbare Daten.

Genau hier liegt die strategische Rolle von Datenräumen. Sie schaffen die strukturellen Voraussetzungen für KI-Training, Inferenz und kontinuierliches Lernen über Unternehmens- und Werksgrenzen hinweg ohne zentrale Datenhaltung und ohne Verlust der Datensouveränität. Kollaborative Lernansätze, verteiltes Training und auditierbare KI-Entscheidungen werden damit erstmals praktikabel.

Datenräume sind daher kein optionales Add-on für Industrial AI, sondern deren unterstützende Grundlage. Ohne interoperable, souveräne Dateninfrastrukturen bleibt Industrial AI auf lokale Insellösungen beschränkt und entfaltet ihr Potenzial nicht.

Zentrale Botschaft für Entscheider

Industrielle Datenräume sind ein strategischer Hebel für Resilienz, Nachhaltigkeit und vor allem Wettbewerbsfähigkeit, Innovation und digitale Souveränität. Sie ermöglichen neue Geschäftsmodelle, skalierbare Services und leistungsfähige Industrial-AI-Anwendungen. Der Aufbau entsprechender Fähigkeiten ist kein kurzfristiges IT-Projekt, sondern eine infrastrukturelle Investition in die Zukunft industrieller Wertschöpfung.

Unternehmen, die jetzt handeln, Standards mitgestalten und Ökosystem-Partnerschaften aufbauen, sichern sich Gestaltungsspielräume in einer zunehmend datengetriebenen Industrie. Wer abwartet, riskiert Abhängigkeiten, Margenverlust und den Verlust strategischer Handlungsfähigkeit.

1. Ausgangslage und industrieller Wandel

Die verarbeitende Industrie steht vor einem strukturellen Wandel, der weit über die Digitalisierung einzelner Prozesse hinausgeht. Markt- und Technologiezyklen verkürzen sich, globale Wettbewerber agieren auf gleichem Qualitäts- und Performance-Niveau, und Regulierungsvorgaben verändern den industriellen Handlungsrahmen. Gleichzeitig zeigt sich, dass klassische Digitalisierungsansätze der vergangenen Jahre – häufig geprägt von Insellösungen, proprietären Plattformen und punktuellen Initiativen – nicht ausreichen, um Produktivität, Transparenz und Innovationskraft in der Breite zu verbessern.

Europa und insbesondere der deutsche Maschinen- und Anlagenbau stehen heute an einer Weggabelung: Entweder gelingt es, Digitalisierung als strategische Notwendigkeit und Daten als wichtige Ressource zu nutzen und im nächsten Schritt in skalierbare datenbasierte Ökosysteme zu integrieren – oder die Branche verliert schrittweise Anschluss an globale Wettbewerber.

Datenräume sind dabei Instrumente, um industrielle Datenwertschöpfung effizient, interoperabel und souverän zu ermöglichen. Ein industrieller Datenraum ist dabei kein zentraler Datenspeicher und keine Plattform, sondern ein föderierter Rahmen aus organisatorischen, rechtlichen und technischen Regelungen, die festlegen, wie Daten geteilt, genutzt und kontrolliert werden und welche Rechte und Pflichten die beteiligten Akteure haben (Governance). Der Datenraum erlaubt es Unternehmen, Daten und Informationen kontrolliert über Unternehmensgrenzen hinweg zu teilen und zu nutzen, ohne die Hoheit über die eigenen Daten aufzugeben. Die konkrete Ausgestaltung, Architektur und Funktionsweise industrieller Datenräume wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert [1].

1.1 Externe Treiber des Wandels

Markt- und Wettbewerbsdruck:

Weltweit haben digitale Plattformunternehmen, insbesondere Hyperscaler wie Amazon, Microsoft oder Google, bewiesen, wie Skaleneffekte, Datenaggregation und Software-dominiertes Wertschöpfungswachstum funktionieren. Während sie im B2C-Bereich häufig die direkte Kundenbeziehung kontrollieren, übernehmen sie im industriellen Kontext vor allem zentrale Rollen in der digitalen Infrastruktur, z.B. durch Cloudplattformen oder KI-Services. Der europäische Maschinenbau läuft Gefahr, genau in

diese Abhängigkeit zu geraten. Das physische Produkt sollte zur Differenzierung gegenüber dem internationalen Wettbewerb zunehmend durch digitale Produkte und datengetriebene Services ergänzt werden. Im Bereich KI und Software dominieren jedoch nicht-europäische Anbieter [2].

Regulatorische Rahmenbedingungen:

Mit der europäischen Datenstrategie sind in kurzer Zeit entscheidende Vorschriften entstanden, die den Zugang zu Daten neu ordnen und die europäische Industrie in die Lage versetzen sollen, digitale Souveränität zurückzugewinnen.

Dazu gehören:

- EU Data Act – fairer und verpflichtender Zugang zu Daten vernetzter Produkte (Anwendung seit 12. September 2025) [3]
- Data Governance Act (DGA) – Regeln für vertrauenswürdige Datenvermittler und sichere Datenaustauschmechanismen [4]
- Digital Markets Act (DMA) – Beschränkung der Marktmacht von Gatekeepern
- EU AI Act – Regulierung der sicheren und verantwortlichen Nutzung von KI
- Ökodesign-Verordnung – Einführung des digitalen Produktpasses als Dateninfrastruktur über den Lebenszyklus hinweg

Alle diese Regulierungen wirken gemeinsam auf die Industrie ein und erzeugen sowohl Handlungsdruck als auch Chancen für Innovation.

Technologische Beschleunigung:

Cloud-Computing, Edge-Systeme, KI, moderne Identitätsmanagementsysteme und standardisierte Schnittstellen haben die Voraussetzungen geschaffen, Daten souverän, sicher und ökonomisch verwertbar zu teilen. Datenräume bilden hierbei nur die technische Infrastruktur, die diese Daten nutzbar macht, sie ersetzen keine Geschäftsmodelle, sondern unterstützen sie.

1.2 Strukturelle Herausforderungen in Europa

Seit über einem Jahrzehnt stagniert die Produktivität in Deutschland. Europäische Unternehmen investieren signifikant weniger in digitale Technologien als ihre Wettbewerber in den USA oder Asien. Der Draghi-Bericht im Auftrag der Europäischen Kommission unterstreicht, dass Europa vor allem an fehlender Produktivitätsdynamik leidet, innovative Unternehmen zu gering skalieren und neue digitale Geschäftsmodelle zu langsam entstehen. Parallel dazu fehlt ein funktionierender digitaler Binnenmarkt für Daten: Trotz starker industrieller Wertschöpfung basiert die digitale Wertschöpfung in Europa bislang überwiegend auf proprietären Lösungen, geschlossenen Plattformen und isolierten Insellösungen. Diese Fragmentierung verhindert Skalierung, erzeugt Abhängigkeiten in Form von Vendor-Lock-in und bremst Innovation entlang ganzer Lieferketten [1, 2].

Gleichzeitig verschärft sich der Fachkräftemangel, während logistische, regulatorische und technologische Anforderungen kontinuierlich komplexer werden. Die Verfügbarkeit qualifizierter Fachkräfte ist zunehmend begrenzt, und ohne zusätzliche Automatisierung sowie datenbasierte Prozessoptimierung wird es Unternehmen künftig kaum möglich sein, diese steigende Komplexität wirtschaftlich zu bewältigen. Daten nutzbar zu machen, wird damit zur Grundvoraussetzung industrieller Wettbewerbsfähigkeit.

1.3 Auf dem Weg zur europäischen Datenökonomie

Die Europäische Kommission verfolgt mit ihrer Datenstrategie einen klaren industriepolitischen Ansatz mit dem Ziel, die wirtschaftliche Nutzung von Daten zu stärken und eine souveräne europäische Datenökonomie aufzubauen. Im Kern basiert dieser Ansatz auf drei zentralen Ideen. Erstens sollen künftig deutlich mehr Produktinformationen digital und damit Daten insgesamt verfügbar sein: Durch den Data Act, die Ökodesign-Verordnung und den digitalen Produktpass werden wesentlich mehr Daten technisch zugänglich, rechtlich nutzbar und interoperabel bereitgestellt werden. Zweitens sollen vertrauenswürdige Strukturen für den souveränen Datenaustausch entstehen. Dazu tragen der Data Governance Act, eIDAS 2.0 und die GAIA-X-Frameworks bei, die verbindliche Regeln, Rollen und Identitäten für sichere und nachvollziehbare Datenflüsse definieren. Drittens setzt die europäische Datenstrategie auf offene, föderierte Systeme statt proprietärer Plattformen. Föderierte Datenräume sollen europäische

Alternativen zu geschlossenen Cloud- und Plattformmodellen schaffen und die Grundlage für eine interoperable Datenökonomie bilden [5].

Beispiele wie Catena-X, Smart Connected Supplier Network (SCSN), der Mobility Data Space oder Pontus-X zeigen bereits heute, wie solche interoperablen Datenräume in der Praxis funktionieren und welche Produktivitäts- und Kostenvorteile sich in unternehmensübergreifenden Prozessen realisieren lassen [6].

1.4 Konsequenzen für den Maschinen- und Anlagenbau

Der Maschinenbau ist doppelt betroffen:

- als Hersteller vernetzter Produkte (Pflichten aus dem Data Act, digitale Geschäftsmodelle, neue Software- und Datenkompetenzen), [3]
- als Betreiber komplexer Produktionsumgebungen (Effizienzsteigerung, Automatisierung, Supply-Chain-Transparenz, Nachhaltigkeit).

Industrielle Datenräume adressieren eine Reihe zentraler Pain Points der Branche. Sie ermöglichen einen deutlich schnelleren und zugleich kompatibleren Zugang zu Produkt- und Produktionsdaten und schaffen damit die Grundlage für transparente, interoperable Informationsflüsse. Gleichzeitig entfallen viele der bisher üblichen unterschiedlichen Schnittstellen, was Integrationsaufwände und -kosten spürbar reduziert. Durch standardisierte Mechanismen und technische Interoperabilität wird zudem eine umfassende Bereitstellung industrieller Daten für Industrial AI möglich, die Anwendungen zur Prozess- und Produktionsoptimierung, der Vorhersage von beispielsweise Energielastspitzen oder die „autonome Fabrik“ technisch ermöglicht und damit wirtschaftlich nutzbar macht. Darüber hinaus unterstützen Datenräume Unternehmen dabei, regulatorische Anforderungen wie den Digitalen Produktpass (DPP), den Product Carbon Footprint (PCF) oder verschiedene Transparenz- und Nachweispflichten in der Lieferkette effizient zu erfüllen. Nicht zuletzt eröffnen sie neue Umsatzquellen durch datenbasierte Produkte und Services, die sich durch den unternehmensübergreifenden Ansatz skalieren lassen [4].

Vor diesem Hintergrund ist die strategische Frage für Unternehmen nicht mehr, ob Datenräume relevant werden, sondern wie schnell sie sie adaptieren und welche Rolle sie in diesen Ökosystemen einnehmen wollen.

1.5 Ausgangspunkt für Manufacturing-X

Manufacturing-X (MX) ist als Förderrahmen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie für verschiedene Forschungs- und Anwendungsprojekte gestartet, um den Aufbau industrieller Datenökosysteme in verschiedenen Industriebranchen voranzutreiben. Eine dieser Branchen ist der Maschinen- und Anlagenbau. MX verbindet regulatorische Anforderungen, technische Standards, interoperable Architekturbausteine, datenbasierte Produkte und Geschäftsmodelle sowie konkrete industrielle Anwendungsfälle. Damit ist Manufacturing-X ein zentraler industriepolitischer Hebel, um branchenübergreifende Kompatibilität herzustellen, Innovation zu beschleunigen, Produktivität zu steigern und die europäische Industrie unabhängig von proprietären Plattformen zu halten [7].

Die Analyse in Kapitel 1 zeigt deutlich: Der industrielle Wandel, die Notwendigkeit der Ergänzung der physischen Produkte um digitale Produkte und datenbasierte Services sowie die neue regulatorische Realität machen es für den Maschinen- und Anlagenbau zwingend erforderlich, Daten als strategische Ressource zu verstehen und zu nutzen. Genau an dieser Stelle setzen industrielle Datenräume an [7].

Mit Manufacturing-X existiert ein förderpolitischer Rahmen, der diese Entwicklung gezielt unterstützt. In zahlreichen öffentlich geförderten Projekten werden derzeit unterschiedliche branchenspezifische Datenräume praktisch erprobt, gemeinsame technische Bausteine entwickelt und Interoperabilität zwischen Diensten, Schnittstellen und Architekturen sichergestellt. Manufacturing-X liefert das technische und organisatorische Fundament, auf dessen Basis eine industrielle Datenökonomie entstehen kann [7].

Bevor jedoch geklärt werden kann, wie Datenräume in der Praxis funktionieren oder welche ökonomischen Potenziale sie erschließen, muss zunächst klar sein, was ein Datenraum überhaupt ist, wie er strukturiert ist und welche Prinzipien ihm zugrunde liegen [7].

Genau diese Grundlagen behandelt das folgende Kapitel.

2. Grundlagen und Wirkmechanismen industrieller Datenräume

Die Analyse des industriellen Wandels macht deutlich, warum Datenräume für den Maschinen- und Anlagenbau zu einem strategischen Thema werden. Um ihr Potenzial zu verstehen, ist jedoch zunächst zu klären, was sich hinter den grundlegenden Begriffen verbirgt und wie industrielle Datenräume funktionieren. Dieses Kapitel schafft das notwendige Fundament, um die weiteren technischen, organisatorischen und ökonomischen Aspekte richtig einordnen zu können.

Industrielle Datenräume stellen einen strukturierten Rahmen bereit, in dem Unternehmen Daten souverän, sicher und interoperabel miteinander austauschen können, ohne zentrale Abhängigkeiten und ohne Kontrolle über die eigenen Daten zu verlieren. Dabei geht es nicht um einen einzelnen Datenpool oder eine zentrale Plattform, sondern um eine föderierte Infrastruktur unter einer gemeinsamen Governance, die es vielen Unternehmen und Institutionen ermöglicht, Daten kontrolliert zu teilen und zu nutzen. Das Zusammenspiel aus Regeln, Technologien, gemeinsamen Standards und Governance-Mechanismen definiert, wie dieser Austausch stattfindet [8].

2.1 Datensouveränität als Grundprinzip

Das Leitprinzip industrieller Datenräume ist die Datensouveränität. Unternehmen behalten die vollständige Kontrolle darüber, wer ihre Daten nutzen darf, zu welchem Zweck, unter welchen Bedingungen und wie lange.

Im Gegensatz zu proprietären Plattformen, bei denen Daten nach dem Upload faktisch in fremder Hand liegen, ermöglichen Datenräume eine feinsteuerbare Kontrolle über Nutzungsrechte. Durch technische Mechanismen wie Access und Usage Control, Policies und digitale Identitäten wird diese Kontrolle nicht nur vertraglich, sondern soweit möglich auch technisch durchgesetzt. Datensouveränität schafft Vertrauen – eine Grundvoraussetzung, damit Unternehmen bereit sind, sensible Produkt-, Produktions-, Qualitäts- oder Nutzungsdaten mit Kunden, Zulieferern oder Dienstleistern zu teilen [9].

2.2 Interoperabilität: Die Voraussetzung für Skalierung

Ein zentraler Wirkmechanismus industrieller Datenräume ist die Interoperabilität, also die Fähigkeit verschiedener Systeme, Organisationen und Softwarelösungen, effizient zusammenzuarbeiten [10].

Interoperabilität umfasst vier Ebenen:

- Syntaktische Interoperabilität – einheitliche Schnittstellen und Austauschformate
- Semantische Interoperabilität – gemeinsame Bedeutungen, Modelle und Domänenbegriffe (z. B. Asset Administration Shell (AAS), OPC Unified Architecture (OPC UA))
- Organisatorische Interoperabilität – abgestimmte Prozesse und Rollen über Unternehmensgrenzen hinweg
- Rechtliche Interoperabilität – gemeinsame Regeln, Verträge und Rahmenbedingungen für die Datennutzung

Erst wenn all diese Ebenen zusammenwirken, können Datenräume über einzelne Pilotprojekte hinaus skalieren und in industriellen Wertschöpfungsketten dauerhaft funktionieren. Interoperabilität ist der strukturelle Schlüssel zur Effizienzsteigerung und Standardisierung [10].

2.3 Sichere Kollaboration über Unternehmensgrenzen hinweg

Industrielle Datenräume ermöglichen es, dass Unternehmen Daten austauschen, ohne ihre Souveränität oder Wettbewerbsposition zu gefährden. Grundlage dafür sind eindeutige digitale Identitäten für alle Teilnehmer, vertrauenswürdige Föderationsdienste wie Zertifizierungs-, Registrierungs- und Policy-Prüfstellen, verschlüsselte Datenverbindungen, auditierbare und nachvollziehbare Austauschprozesse sowie eine dezentrale Architektur, die keine zentrale Kontrollinstanz entstehen lässt. Diese Mechanismen schaffen ein Gleichgewicht zwischen Offenheit und Kontrolle. Unternehmen können flexibel entscheiden, in welchen Anwendungsfällen sie Daten teilen oder beziehen – und dies ohne den Aufbau individueller bilateraler Schnittstellen oder die Entwicklung eigener Austauschplattformen [9, 11].

2.4 Datenbasierte Produkte und die Wertlogik im Datenraum

Datenräume ermöglichen keine Wertschöpfung per se, sie schaffen die technischen und organisatorischen Voraussetzungen dafür. Die tatsächliche Wertschöpfung entsteht durch datenbasierte Produkte und Services, die auf den über den Datenraum verfügbaren Daten aufbauen. Diese Produkte können beispielsweise Qualitäts-, Energie- oder Prozessdatenservices, prädiktive Wartungsmodelle, Traceability- und Lieferkettenlösungen, KI-basierte Optimierungsdienste oder produktbezogene Information Services (z. B. für DPP/PCF) sein.

Datenbasierte Produkte und Services der Unternehmen bilden die betriebswirtschaftliche Basis der Datenökonomie. Sie machen den Nutzen für Unternehmen greifbar und wirtschaftlich bewertbar – und bilden deswegen das Bindeglied zwischen Technologie, Organisation und Geschäftsmodellen (Näheres hierzu in Kapitel 5) [10].

2.5 Architekturbausteine und Funktionslogik

Auch wenn die konkreten Implementierungen variieren, folgen industrielle Datenräume einem gemeinsamen Funktionsprinzip:

Sie verbinden Identitäten, Konnektoren, Policies, Verträge und Föderationsdienste zu einem konsistenten System, das interoperablen Datenaustausch ermöglicht. Typische Architekturbausteine sind [8]:

- Teilnehmer-Identitäten (z. B. Wallets, Zertifikate, eIDAS)
- Konnektoren als technische Gateways bzw. Schnittstelle für Datenaustausch [11]
- Datenkataloge zur Auffindbarkeit von Angeboten
- Access- und Usage-Control-Mechanismen zur Durchsetzung von Nutzungsrechten [9]
- Föderationsdienste wie Clearing Houses, Policy Authorities, Vocabulary Services oder Registrare

Wichtig ist: Ein Datenraum ist die Summe aus interoperablen Diensten, Standards, Regeln und Rollen.

2.6 Datenräume als Ausgangspunkt für neue Wertschöpfungsstrukturen

Industrielle Datenräume schaffen die strukturelle Grundlage dafür, dass Wertschöpfungsketten digital vernetzt werden und effizient sowie transparent funktionieren können. Um sie herum können sich digitale Ökosysteme bilden, welche aus einem oder mehreren Datenräumen bestehen. Diese werden auch häufig als Datenökosysteme bezeichnet, und dank ihrer Interoperabilität ermöglichen sie automatisierte Informationsflüsse über Unternehmensgrenzen hinweg, unterstützen KI-basierte Analysen ohne proprietäre Abhängigkeiten und stellen sicher, dass Nachweisbarkeit und Compliance von Anfang an in die Datenverarbeitung integriert sind. Gleichzeitig eröffnen sie neue datenbasierte Geschäftsmodelle und sorgen dafür, dass Anwendungsfälle deutlich schneller einen messbaren wirtschaftlichen Nutzen entfalten können [10].

Die in diesem Kapitel beschriebenen Grundlagen zeigen, wie industrielle Datenräume strukturell funktionieren und welche Prinzipien ihnen zugrunde liegen – von Datensouveränität über Interoperabilität bis hin zu den föderierten technischen Bausteinen und datenbasierten Produkten als eigentlicher Einheit der Wertschöpfung. Abbildung 1 fasst die beschriebenen Grundlagen zusammen.

Vor dem Hintergrund des strategischen Nutzens wird deutlich, warum unternehmerische Entscheidungen notwendig sind. Datenräume verändern Geschäftsmodelle, Rollen in Wertschöpfungsketten, Produktstrategien und die Art und Weise, wie Unternehmen miteinander zusammenarbeiten.

Im nächsten Schritt geht es daher darum, herauszuarbeiten, welche strategische Bedeutung industrielle Datenräume für den Maschinen- und Anlagenbau haben, welche Wettbewerbsfaktoren sie beeinflussen und warum Unternehmen jetzt entscheiden sollten, wie sie sich künftig in solchen Ökosystemen positionieren wollen. Genau diese Perspektive beleuchtet das folgende Kapitel.

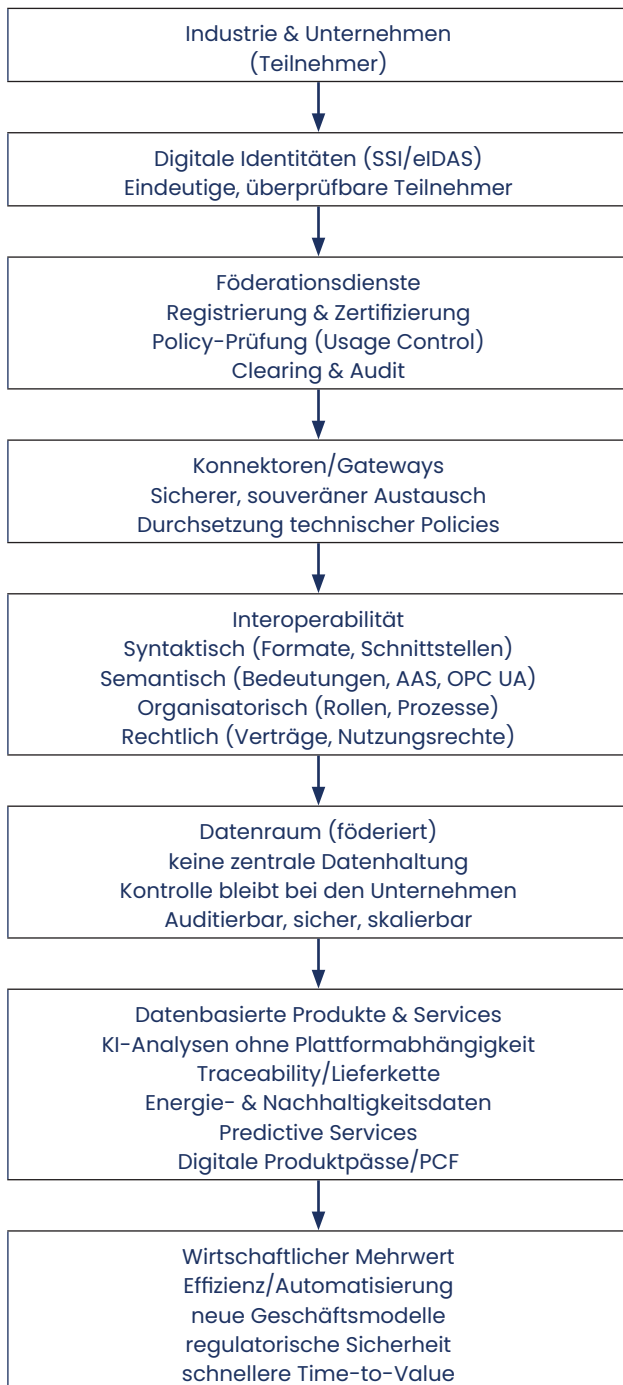


Abbildung 1: Grundlagen und Wirkmechanismen in industriellen Datenräumen

3. Strategische Relevanz für Entscheider

3.1 Datenräume als strategische Basisinfrastruktur

Kapitel 1 hat gezeigt, dass der Maschinen- und Anlagenbau unter gleichzeitigem Markt-, Regulierungs- und Technologiedruck steht. Kapitel 2 hat die Funktionslogik industrieller Datenräume als Rahmen für souveränen, sicheren und interoperablen Datenaustausch beschrieben. Daraus folgt eine strategische Konsequenz: Die zentrale Differenzierung verschiebt sich weg von isolierten digitalen Lösungen hin zur Fähigkeit, über Unternehmensgrenzen hinweg verlässlich datenbasiert, standardisiert und kontrollierbar zusammenzuarbeiten.

Für Entscheider ist das keine Detailfrage der IT, sondern eine Frage der Wettbewerbsposition: Wer künftig Wertschöpfung entlang von Lieferketten, Service-Netzwerken und regulatorischen Nachweispfaden erbringen möchte, braucht eine Infrastruktur und ein Betriebsmodell, das multilaterale Kooperation ermöglicht. Genau hier setzt das Konzept der Datenräume an.

3.2 Grundlegende neue Infrastrukturen lösen neue Innovationen aus

Viele Unternehmen tauschen Daten bereits bilateral von Original Equipment Manufacturer (OEM) zu Kunde, OEM zu Zulieferer und Dienstleister zu Betreiber aus. Das bringt punktuelle Verbesserungen, bleibt aber strukturell begrenzt. Der echte strategische Mehrwert entsteht erst, wenn mehrere Akteure gleichzeitig auf einer gemeinsamen, vertrauenswürdigen und multilateralen Datenbasis arbeiten können, denn industrielle Probleme sind selten bilateral.

Resiliente Lieferketten, integrierter After-Sales-Service, Traceability, DPP/PCF-Nachweise, Qualitätsketten oder Energieoptimierung funktionieren nur, wenn Daten über mehrere Stufen hinweg verfügbar und kompatibel sind. Die meisten bilateralen Integrationen lassen sich nicht über mehreren Instanzen und Unternehmensgrenzen hinweg skalieren. Die Folge sind teure, langsame und unübersichtliche Sonderlösungen [12].

Multilaterales Datenteilen wird damit zur strategischen Voraussetzung, da es systemische Transparenz ermöglicht, um Risiken und Engpässe über mehrere Stufen sichtbar zu machen. Einmal definierte Modelle und Regeln

sorgen für Wiederverwendbarkeit bei vielen Partnern, wodurch Mehrwerte über Ökosystemeffekte generiert werden können.

3.3 Warten ist keine Strategie

Eine der häufigsten Fehlannahmen in Technologieentscheidungen lautet: „Wir warten, bis die Technologie ausgereift ist.“ Diese Strategie klingt vernünftig, ist aber in der Praxis regelmäßig mit hohen Kosten verbunden. Mit Data Act, DGA, DPP/Ökodesign und KI-Regeln steigt der Druck, Daten zugänglich, beschreibbar, interoperabel und auditierbar zu machen. Entscheidend ist nicht nur „Daten haben“, sondern „Daten bereitstellen und nachweisen können“ – über Grenzen hinweg.

In vielen Segmenten reicht Differenzierung über reine Produktmerkmale nicht aus. Kunden verlangen Verfügbarkeit, Energieeffizienz, Transparenz, Compliance-Reporting, schnellere Reaktionszeiten. Das sind keine Einmalprojekte, sondern laufende datenbasierte Leistungen, die oft Partnerdaten erfordern.

Ökosysteme setzen sich über Standards, Datenmodelle, Zugangsregeln und Betriebsmodelle durch. Wer später einsteigt, akzeptiert bereits definierte Schnittstellen und Konditionen und verliert Gestaltungsspielraum. Das gilt in Europa (z. B. branchenspezifische Datenräume) genauso wie im Wettbewerb mit proprietären Plattformangeboten globaler Anbieter.

Die Botschaft für Entscheider ist damit eindeutig: Warten ist kein neutraler Zustand. Warten bedeutet, dass andere die technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Spielregeln festlegen.

Europa und Deutschland haben hier eine klare strategische Antwort formuliert: Das System aus verschiedenen Initiativen wie z. B. Gaia-X, IDSA (International Data Spaces Association) und branchenspezifischen Initiativen wie Manufacturing-X oder Catena-X stellt ein souveränes, dezentrales Gegenmodell zur plattformdominierten Datenwirtschaft dar. Dieser Weg basiert auf europäischen Werten: Transparenz, Fairness, Datensouveränität und Interoperabilität. Unternehmen, die sich aktiv in diesen Initiativen engagieren, positionieren sich als gestalterische Akteure in einem globalen Markt und nicht als passive Empfänger von Regeln, die andere für sie entworfen haben [13].

3.4 Der Nutzen entsteht durch multilaterales Teilen

Datenräume sind strategisch relevant, weil sie konkrete Hebel für Unternehmensziele öffnen.

Sicheres, souveränes und interoperables Datenteilen über mehrere Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht operative und messbare Vorteile:

- Resilienz und Lieferfähigkeit: bessere Prognosen und frühere Risikoerkennung über mehrere Stufen
- Service-Marge und Kundenbindung: skalierbare datenbasierte Services, schnellere Problemlösung, Uptime-Modelle
- Effizienz und Produktivität: weniger Schnittstellenaufwand, automatisiertere Abstimmungen, bessere Datenqualität
- Innovation und Time-to-Market: schnellerer Aufbau neuer Angebote durch wiederverwendbare Datenprodukte und Standards
- Compliance und Nachweisfähigkeit: DPP/PCF/Traceability nicht als „Sonderprojekt“, sondern als Betriebsfähigkeit
- Industrial AI-Readiness: Datenqualität, Semantik, Governance und Zugriff als Voraussetzung für KI-Skalierung (Kapitel 9)

Dabei steigt der Nutzen eines Datenraums mit der Anzahl der Teilnehmer und mit der Dichte der geteilten Informationen [14]. Zusätzlich ist es wichtig, dass dieser Hebel nicht durch Datenteilen allein, sondern durch die Kombination aus multilateralem Datenaustausch, Interoperabilität, Governance sowie klaren Daten- und Datendienstleistungsprodukten entsteht.

Für Entscheider bedeutet das: Der Einstieg in einen Datenraum ist eine Entscheidung für ein Ökosystem. Die Frage ist nicht nur, ob man Daten teilen möchte, sondern wie die Umsetzung am besten gelingt und mit wem man in Zukunft ein gemeinsames, digitales Wertschöpfungsnetzwerk aufbauen will. Je früher diese strategische Partnerschaft gestaltet wird, desto stärker ist die eigene Verhandlungsposition im entstehenden Ökosystem.

3.5 Strategische Handlungsimplicationen

Multilaterales Datenteilen und der Aufbau von Datenökosystemen mittels industriellen Datenräumen ist nicht „ein Projekt“, sondern eine Positionierungsentscheidung. Daher sollten sich Entscheider drei zentrale Fragen stellen [15]:

1. Welche Rolle wollen wir im Datenökosystem bzw. Wertschöpfungsnetzwerk einnehmen?
Daten-Nutzer, Daten-Anbieter, Co-Creator im Netzwerk oder Enabler/Orchestrator (mit mehr Einfluss, aber auch mehr Verantwortung).
2. Welche Anwendungsfelder liefern unternehmensübergreifenden Nutzen?
Fokus auf Anwendungsfälle, die mehrere Partner betreffen und Skaleneffekte ermöglichen (Lieferkette, After-Sales, Qualität, Nachhaltigkeit, Energie).
3. Wie sichern wir Anschlussfähigkeit statt Insellösungen?
Teilnahme an Initiativen und Abstimmung auf Referenzmodelle (Kapitel 5), Governance-/Betriebsfähigkeit (Kapitel 7) und rechtliche Absicherung (Kapitel 8).

Manufacturing-X ist in diesem Kontext der förderpolitische und organisatorische Rahmen, in dem Interoperabilität zwischen Projekten, Diensten und gemeinsamen Architekturen angestrebt wird. Für Unternehmen ist das relevant, weil es den Einstieg erleichtert, Standards bündelt und Skalierungsfähigkeit erhöht.

Multilaterales Datenteilen wird zur Voraussetzung, weil zentrale Industrieziele wie Resilienz, Service-Wertschöpfung, Nachweisfähigkeit und Industrial AI ohne unternehmensübergreifende Datenfähigkeit nicht skalieren. Datenräume sind der Ansatz, diese Fähigkeit souverän, interoperabel und regelbasiert aufzubauen.

Damit stellt sich als nächster Schritt nicht mehr die Frage „Warum Datenräume?“, sondern „Wie entsteht daraus betriebswirtschaftlicher Nutzen?“.

4. Digitale Produkte und Services im Datenraum – betriebswirtschaftlicher Nutzen und Geschäftsmodelle

Dieses Kapitel zeigt, wie digitale Produkte und Services im Kontext von Datenräumen einen betriebswirtschaftlichen Nutzen erzeugen können. Dabei wird der Weg vom digitalen Feature über skalierbare Geschäftsmodelle bis hin zu systemischen ökonomischen Wirkmechanismen und konkreten Anwendungsfällen im After-Sales-Service in einem Datenökosystem aufgezeigt.

Maschinenhersteller haben über Jahrzehnte hinweg ihre Kompetenz in der Entwicklung, Fertigung und Vermarktung hochwertiger Maschinen kontinuierlich ausgebaut. Im Vordergrund standen dabei Präzision, Durchsatz und Qualität – der „Mercedes“ auf dem Weltmarkt. Auf dieser Basis sind in Deutschland zahlreiche Weltmarktführer entstanden. Diese Situation hat sich durch den wachsenden Wettbewerb aus Fernost geändert. Chinesische Wettbewerber bieten vergleichbare Produkte deutlich günstiger an. Häufig unterbieten chinesische Anbieter deutsche Unternehmen um mehr als 30 Prozent. [16].

Geht es um die Differenzierung, eignen sich klassische Produktmerkmale der Maschine, beispielsweise bei Standardmaschinen und Werkzeugmaschinen im mittleren Leistungsbereich, immer weniger. Neue Ansätze zur Abgrenzung sind deshalb erforderlich, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Lediglich Maschinen in High-End- oder Spezialsegmenten können hier noch Differenzierungsmerkmale aufweisen.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Weiterentwicklung eines Maschinenherstellers vom reinen Produkthersteller hin zum intelligenten Lösungsanbieter an Bedeutung. Dabei bleibt die physische Maschine ein Wettbewerbsfaktor der technologischen Weiterentwicklung, wobei insbesondere die Beherrschung komplexer Fertigungsprozesse Differenzierung ermöglicht. Darüber hinaus ermöglicht Industrial AI neue Alleinstellungsmerkmale, wenn sie in die Maschinensteuerung, die Prozessmodelle und die übergeordneten digitalen Wertschöpfungsnetzwerke integriert wird.

Gleichzeitig liegt der Schwerpunkt vieler Geschäftsmodelle weiterhin auf dem einmaligen Verkauf der physischen Maschine [17]. Die Potenziale digitaler Services

und datenbasierter Geschäftsmodelle werden bislang nur teilweise ausgeschöpft. Hier besteht erhebliches wirtschaftliches Entwicklungspotenzial, sowohl in der Monetarisierung neuer Leistungen als auch in der Stärkung von Kundenbindung und Differenzierungsfähigkeit, insbesondere in Verbindung mit einem Datenökosystem.

4.1 Digitale Produkte und Services im Datenökosystem

Digitale Produkte und Services erweitern im Maschinenbau die klassische Maschine um teils kontinuierliche, datenbasierte Funktionen und Leistungen. Die Maschine wird dabei durch digitale Lösungen ergänzt, die sich auf Eigenschaften des Produktes, dessen Nutzung, Verfügbarkeit und die erzielten Ergebnisse der Maschine beziehen. Ziel dieser Lösungen ist es, Produktivität, Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit entlang der industriellen Wertschöpfungskette zu steigern und damit den Kunden des Maschinenbaus einen messbaren Nutzen zu bieten. Datenökosysteme wie Manufacturing-X [18] oder Pontus-X [19] schaffen Rahmenbedingungen und Referenzarchitekturen für einen standardisierten, souveränen Datenaustausch. Auf dieser Basis können nicht nur die Maschinenhersteller skalierbare digitale Produkte und Angebote entwickeln, After-Sales-Leistungen gezielt verbessern und in ihrer Effizienz steigern, sondern auch die Anlagenverfügbarkeit erhöhen und neue datenbasierte Services realisieren. Insgesamt profitieren Maschinenbauer, Komponentenhersteller, Dienstleister und Produktionsunternehmen gleichermaßen.

Voraussetzung für die Entwicklung datenbasierter digitaler Angebote ist in der Regel, Maschinen und Anlagen in ihrer Produktionsumgebung zu vernetzen [20]. Aufbauend auf einer vernetzten Maschine kann ihr Funktionsumfang durch digitale Produkte und Services erweitert und optimiert werden, wie Abbildung 2 zeigt. Dadurch lassen sich zusätzliche Umsatzpotenziale erschließen und neue Differenzierungsmerkmale entwickeln. Daraus abgeleitet können Geschäftsmodelle wie das Subskriptionsmodell umgesetzt werden, bei dem Kunden für die kontinuierliche



Abbildung 2: Stufenmodell für die Transformation eines Unternehmens vom Produkthersteller zum Lösungsanbieter, nach [20]

Nutzung von Maschinenfunktionen oder digitalen Services regelmäßig wiederkehrende Zahlungen leisten, anstatt das Produkt einmalig zu erwerben [22].

Typische digitale Produkte und Services beinhalten folgende Ansätze, siehe auch [21], die sich teilweise im Rahmen eines integrierten Wertschöpfungszenarios im Datenökosystem nutzenbringend kombinieren lassen.

Zustandsüberwachung und vorbeugende Wartung (Predictive Maintenance)

Die kontinuierliche Überwachung von Maschinen- und Prozesszuständen auf Basis von Sensordaten, z. B. über OPC UA, ermöglicht es, Abweichungen und Verschleiß frühzeitig zu erkennen, um darauf basierend Wartungsmaßnahmen zustandsabhängig statt intervallbasiert auszulösen.

Remote Support

Ein Fernzugriff auf Maschinen zur Diagnose, beispielsweise auf Basis von OPC UA in Kombination mit einer sicheren Netzwerkarchitektur, ermöglicht einen effizienten Online-Support. In Verbindung mit Video- oder Kameraunterstützung können Fehler analysiert, Parameter angepasst und Optimierungen durchgeführt werden. Einfache software- oder einstellungsbezogene Störungen lassen sich gegebenenfalls remote beheben.

Performance-Dashboards

Hierbei handelt es sich um ein die Maschine ergänzendes digitales Produkt, das Betriebskennzahlen wie Energieverbrauch, Qualität oder Verfügbarkeit strukturiert erfasst, visualisiert und potenziell analysiert. Es schafft Transparenz über den aktuellen Zustand von Maschine oder Anlage und unterstützt datenbasierte Entscheidungen im Betrieb. In Verbindung mit statistischen Analysen oder industrieller KI erweitern sich Performance-Dashboards von reiner Visualisierung hin zu prognose- und handlungsorientierten Systemen.

Ersatzteil- & Lifecycle-Management

Ein zentraler Baustein eines datenbasierten Lifecycle-Managements ist es, Komponenten über den gesamten Lebenszyklus hinweg digital nachzuverfolgen. Eine transparente Dokumentation von Nutzung, Wartung und Austauschhistorie lässt Ersatzteile bedarfsgerecht disponieren und Lagerbestände optimieren. Dies senkt Service- sowie Kapitalbindungskosten.

Energie- und Effizienzservices

Energie- und Effizienzservices ermöglichen die systematische Analyse und Optimierung des Energie- und Ressourceneinsatzes in Maschinen und Produktionsprozessen. Durch vertikales Energiedatenmanagement, d.h. von der einzelnen Maschine bis zur Fabrikebene, werden Energieverbräuche transparent erfasst, überwacht und können gezielt optimiert sowie prognostiziert werden. Dies reduziert potenzielle Lastspitzen und senkt Energiekosten.

Services für Informationsaktualisierung

Mit der Digitalisierung steigt die Komplexität von Maschinen durch integrierte Software- und Elektronikkomponenten. Maschinenbauer müssen Varianten, Softwarestände und Updates nachvollziehbar verwalten – auch im Hinblick auf Haftung, Sicherheit und Regulierung. Effizienz entsteht durch automatisiertes, sicheres Update-Management im Netzwerk. Remote-Updates reduzieren Stillstände und Servicekosten, erhöhen Betriebssicherheit und ermöglichen neue Funktionen „on demand“, was Compliance, Wettbewerbsfähigkeit und Kundenbindung stärkt.

Digitale Zwillinge

Der Digitale Zwilling im Maschinen- und Anlagenbau ist ein eigenständiges digitales Produkt und eröffnet damit dem Produkthersteller neue Monetarisierungsmöglichkeiten. Über klassische Produktdaten eines Katalogs hinaus werden verhaltens- und simulationsrelevante Produktinformationen bereitgestellt, etwa dynamische Modelle für die Prozess- und Anlagensimulation. Anwender können Anlagen schneller planen, virtuell in Betrieb nehmen und gezielt optimieren. Daraus entstehen für den Produkthersteller neue Erlösquellen.

4.2 Von digitalen Services zu skalierbaren Geschäftsmodellen

Ein digitales Produkt oder ein digitaler Service ist zunächst eine Funktion oder Leistung (z. B. Zustandsüberwachung, Remote Support), ein Geschäftsmodell beschreibt dagegen, wie ein Unternehmen Leistungen erbringt, Werte schafft und daraus Erlöse generiert. Während digitale Funktionen zunächst operative Vorteile erzeugen, entsteht nachhaltiger ökonomischer Nutzen erst dann, wenn diese Leistungen monetarisiert, organisatorisch verankert und im Rahmen eines Geschäftsmodells über eine breite Kundenbasis hinweg skalierbar gemacht werden [23]. Der Übergang vom digitalen Produkt oder Service zum skalierbaren Geschäftsmodell stellt somit einen wichtigen Transformationsschritt im Maschinen- und Anlagenbau dar.

4.2.1 Vom digitalen Feature zur marktfähigen Wertschöpfung

Viele Digitalisierungsinitiativen beginnen mit einzelnen technologischen Funktionen, z. B. der Zustandsüberwachung, Energieverbrauchsanalysen, dem digitalen Zwilling oder Berechnungen zum PCF, welche die Transparenz erhöhen und operative Entscheidungen verbessern. Für sich genommen stellen sie jedoch noch kein digitales Geschäftsmodell dar.

Erst durch die Bündelung solcher Funktionen zu einem Leistungsversprechen entsteht eine marktfähige Wertschöpfung. Aus isolierten Datenpunkten wird beispielsweise ein Predictive-Maintenance-Service, ein Performance-Optimierungsangebot (OEE-Optimierung) oder ein nachhaltigkeitsbezogenes Reporting-Modell (z. B. PCF-Reporting). Entscheidend ist dabei die konsequente Ausrichtung am Kundennutzen, etwa erhöhte Anlagenverfügbarkeit, reduzierte Lebenszykluskosten, verbesserte Energieeffizienz oder regulatorische Compliance. Dieses Prinzip unterscheidet sich grundsätzlich nicht von klassischen, produktbasierten Geschäftsmodellen im Maschinenbau. Die Digitalisierung erweitert die Möglichkeiten der Wertschöpfung, ersetzt aber nicht die Notwendigkeit einer klaren Kundenorientierung.

Das Geschäftsmodell kann unterschiedliche Formen annehmen, beispielsweise:

- Erweiterte Serviceverträge oder digitale Zusatzleistungen wie Remote Support unter Einsatz von Virtual-Reality- oder Augmented-Reality-Technologien
- Subskriptionsmodelle, also wiederkehrende Zahlungen für die Nutzung von Maschinenfunktionen oder digitalen Services anstelle eines einmaligen Maschinenkaufs
- Nutzungs- oder leistungsabhängige Vergütungsmodelle, z. B. Pay-per-Use, Pay-per-Output, Verfügbarkeitsmodelle (Pay-per-Uptime oder Uptime-Garantien) sowie leistungs- bzw. ergebnisbasierte Vertragsformen [24, 25]
- Vermarktung digitaler Zwillinge, ergänzt um zusätzliche digitale Funktionen über klassische Katalogdaten hinaus, etwa simulationsfähige Verhaltensmodelle für Inbetriebnahme, Optimierung oder Schulung

Allen gemeinsam ist, dass sie auf verlässlichen, standardisierten und auswertbaren Daten beruhen. Daten werden damit zur Grundlage von Geschäftsmodellen. Der Transformationsschritt liegt in der strukturierten Übersetzung technologischer Eigenschaften und daraus resultierender Kundenvorteile in ein bepreistes, wiederholbares und skalierbares Angebot.

4.2.2 Von der Geschäftsmodellinnovation zur ökonomischen Systemwirkung

Die wirtschaftliche Tragfähigkeit datenbasierter Geschäftsmodelle erschließt sich erst im Zusammenspiel aus Wertversprechen, Monetarisierungslogik und den zugrunde liegenden ökonomischen Wirkmechanismen des Datenökosystems. Diese Wirkmechanismen werden im folgenden Kapitel systematisch dargestellt.

4.3 Ökonomische Wirkmechanismen datenraumbasierter Geschäftsmodelle

Datenraumbasierte Geschäftsmodelle entwickeln unabhängig vom konkreten Anwendungsfall wiederkehrende wirtschaftliche Effekte entlang der Wertschöpfungskette. Diese betreffen insbesondere

- Koordinations- und Transaktionskosten,
- Informationsökonomie,
- Skaleneffekte sowie
- Netzwerkexternalitäten.

Im Kern ermöglichen Datenräume, dass Koordinations- und Transaktionskosten entlang der Wertschöpfungskette reduziert werden können. Durch gemeinsame Datenmodelle werden die Schnittstellenkomplexität und Formatvielfalt verringert sowie semantische Inkonsistenzen reduziert. Abstimmungsaufwände sinken, und der Informationsaustausch zwischen Unternehmen lässt sich über unterschiedliche Geschäftsprozesse hinweg stärker automatisieren.

Zugleich erweitert sich die Informationsbasis zwischen den beteiligten Unternehmen. Verfügbarkeitsdaten zu Fertigungskapazitäten, Ersatz- und Verschleißteilen sowie Betriebs-, Nutzungs- und Nachhaltigkeitsinformationen können über standardisierte Schnittstellen bedarfsgerecht und weitgehend zeitnah bereitgestellt werden. Dies umfasst neben operativen Zustandsdaten auch Informationen für Energieverbrauchsanalysen, PCF-Berechnungen oder digitale Zwillinge von Produkten und Anlagen. Dadurch verbessert sich die Qualität unternehmensübergreifender Entscheidungsprozesse. Die erhöhte Transparenz stärkt die Planungssicherheit in der Lieferkette und kann deren Resilienz erhöhen. Gleichzeitig schaffen verlässliche, standardisierte Nutzungs- und Leistungsdaten die Grundlage für neue Vertrags- und Erlösmodelle, etwa nutzungs-, leistungs- oder nachhaltigkeitsbezogene Geschäftsmodelle.

Ein weiterer Wirkmechanismus liegt in der Skalierbarkeit digitaler Produkte und Services. Einmal entwickelte datenbasierte Leistungen können bei entsprechender Standardisierung, z. B. auf Basis von AAS-Submodellen, OPC UA Companion Specifications und Datenraum-Konnektoren, über zahlreiche Anlagen, Kunden und Branchen hinweg ausgerollt werden. Nach der anfänglichen Entwicklungsinvestition steigen die Kosten pro zusätzlichem Kunden oder zusätzlicher Anlage nur geringfügig. Dies eröffnet insbesondere Maschinenherstellern zusätzliche, wiederkehrende Erlösquellen und trägt zur Stabilisierung ihrer Geschäftsmodelle bei.

Netzwerkexternalitäten beschreiben den Effekt, dass der ökonomische Nutzen eines Systems für einzelne Teilnehmer mit der Anzahl der angebotenen Akteure steigt. Durch die Vernetzung mehrerer Unternehmen im Datenraum entstehen potenzielle Netzwerk- und Ökosystemeffekte: Mit wachsender Teilnehmerzahl erhöhen sich Datenvielfalt, Anwendungsbreite und Innovationspotenziale. Dadurch verschiebt sich Wertschöpfung zunehmend von isolierten Einzeltransaktionen hin zu koordinierten, datengetriebenen Wertschöpfungsstrukturen.

Diese generischen ökonomischen Wirkmechanismen bilden die Grundlage für konkrete Anwendungs- und Erlösszenarien, wie sie im Folgenden exemplarisch am After-Sales-Service dargestellt werden.

4.4 After-Sales-Service als datenraumbasiertes, integriertes Wertschöpfungsszenario

Der After-Sales-Service im Maschinen- und Anlagenbau ist heute vielfach noch reaktiv oder intervallbasiert organisiert und durch fragmentierte Informationsflüsse zwischen Herstellern, Betreibern und Servicepartnern geprägt. Durch eine integrierte, datenraumbasierte Vernetzung aller relevanten Akteure kann er deutlich effizienter, vorausschauender und kooperativer ausgestaltet werden.

Zustandsüberwachung, die darauf basierende vorausschauende Wartung und Fernzugriffe auf die Maschine bilden die Grundlage für eine Optimierung des After-Sales-Services. Hersteller funktionskritischer und wertintensiver Schlüsselkomponenten können gezielt in den After-Sales-Service eingebunden werden, insbesondere wenn Diagnose, Wartung und Performancebewertung spezielles Hersteller-Know-how erfordern. Ebenso ist es möglich, Service-Dienstleister, beispielsweise Handelsunternehmen mit eigenen Serviceeinheiten oder

unabhängige Wartungspartner, als Teil eines datenraum-basierten Wertschöpfungsnetzwerks in ein Datenökosystem zu integrieren.

Die o.g. Akteure in diesem Anwendungsfall profitieren auf unterschiedliche Art und Weise, wie Abbildung 3 zeigt.

Akteur	Nutzenfeld	Operativer Effekt	Wirtschaftliche Wirkung
Produktionsunternehmen	Reduktion ungeplanter Stillstände	Frühzeitige Fehlererkennung, weniger Produktionsausfälle	geringere ungeplante Stillstandzeiten, erhöhte Uptime, geringere Stückkosten
	Planbare Wartung	Integration in Produktionsplanung, weniger Notfalleinsätze	geringere ungeplante Stillstandzeiten, erhöhte Uptime, geringere Stückkosten
	Reduzierte Kapitalbindung	Ersatzteilbevorratung kann zum Teil verlagert werden, kein Gewährleistungs- und Wertverlust	Senkung Working Capital, verbesserter Cashflow
	Geringeres Produktionsrisiko	Höhere Planungssicherheit	Stabilere Lieferfähigkeit, höhere Wettbewerbsfähigkeit
Maschinenbauer (OEM)	Geringere Lager- und Vorhaltungskosten	Zum Teil Verlagerung von Ersatzteilkhaltung auf Komponentenlieferanten	geringere Lagerkosten
	Effizientere Serviceorganisation	Weniger ungeplante Einsätze, bessere Planung	Effizienzsteigerung im Service
	Skalierbares Servicegeschäft	Datenbasierte Services, Uptime-Modelle	Höhere Service-Margen, wiederkehrende Umsätze
	Produktverbesserung durch Felddaten	Nutzung realer Betriebsdaten für Forschung und Entwicklung (FuE)	Innovationsvorsprung, geringere Entwicklungskosten,
	Stärkere Kundenbindung	Beitrag zur Produktionssicherheit	Langfristige Verträge, geringere Preissensitivität
Komponentenhersteller	Proaktives Servicegeschäft	Zustandsbasierte Wartungsangebote	Umsatzsteigerung im After-Sales
	Optimierte Ersatzteilplanung	Bessere Prognosen, weniger Überbestand	Geringere Logistikkosten
	Reduzierte Garantie- und Kulanzkosten	Früherkennung von Fehlzuständen	Weniger Gewährleistungsfälle
	Produktverbesserung durch Felddaten	Nutzung realer Betriebsdaten für FuE	Innovationsvorsprung, geringere Entwicklungskosten, Differenzierung statt Preiskampf

Abbildung 3: Akteure Nutzen, Effekte und Wirkung bei After-Sales-Services in industriellen Datenräumen

Warum dieser After-Sales-Anwendungsfall über den Datenraum skaliert

Standardisierte Schnittstelle statt individueller Integrationen

Der Datenaustausch erfolgt über einen abgesicherten Konnektor als zentrale technische Schnittstelle. Aufwändige Punkt-zu-Punkt-Integrationen mit einzelnen Partnern entfallen. Dies reduziert Integrationskosten und verkürzt Projektanlaufzeiten erheblich.

Steuerung von Nutzungs- und Zugriffsrechten

Nutzungs- und Zugriffsrechte werden klar definiert und technisch umgesetzt. Berechtigte Partner (z.B. Maschinenbauer oder Komponentenhersteller) erhalten ausschließlich Zugriff auf die jeweils relevanten Daten. Dies stärkt Vertrauen und Akzeptanz.

Sichere Skalierung auf weitere Partner und Komponenten

Neue Servicepartner, Komponentenhersteller oder zusätzliche Maschinen können angebunden werden, ohne die bestehende Architektur grundlegend anzupassen. Die Komplexität wächst nicht exponentiell mit der Anzahl der Integrationen, sondern bleibt strukturell beherrschbar. Zudem lässt sich der Use Case über mehrere Kunden und Branchen, z.B. auf die Automobil- oder Luft- und Raumfahrtindustrie, ausrollen.

Wahrung der Datensouveränität

Ein zentraler Erfolgsfaktor ist die Sicherstellung der Datensouveränität. Jeder Akteur behält die Kontrolle über seine Daten und definiert deren Nutzung. Diese Vertrauensbasis ist entscheidend für die organisatorische und kommerzielle Skalierung.

Übertragbarkeit auf weitere Use Cases

Ist die Infrastruktur etabliert, kann der Datenraum mit geringem Zusatzaufwand für weitere Services wie Ersatzteilmanagement, Remote Support oder Performance-Optimierung genutzt werden.

Der beschriebene Ansatz lässt sich als datenraum-basiertes, integriertes Service-Ökosystem-Geschäftsmodell charakterisieren, in dem mehrere Akteure entlang des Lebenszyklus einer Maschine einen betriebswirtschaftlichen Nutzen für alle Teilnehmer generieren.

4.5 Datenräume als Grundlage skalierbarer Geschäftsmodelle

Zusammenfassend bilden Datenräume die strukturelle und technologische Grundlage, um digitale Produkte und Services in wirtschaftlich skalierbare Geschäftsmodelle zu überführen. Sie ermöglichen deren systematische Monetarisierung über eine breite Kundenbasis hinweg und schaffen damit die Voraussetzung für nachhaltige Umsatzsteigerungen, stabile Margen und langfristige Wettbewerbsfähigkeit.

5. Architekturvarianten, Anwendungsszenarien & Einordnung in Initiativen

Wie schon in Kapitel 2.5 erwähnt, können die Funktionsprinzipien eines Datenraums auf unterschiedliche Weisen implementiert werden. Die Art der Implementierung hängt von dem Zusammenhang (Industrie, Anwendung) ab, unter dem der Rahmen des Datenraums betrachtet wird. Die Schwierigkeit besteht darin, zu verhindern, dass sich verschiedene Implementierungen und daraus resultierende Architekturmodelle zu sehr voneinander unterscheiden. Alle Umsetzungen der Funktionsprinzipien sollten ein Mindestmaß an Interoperabilität auf syntaktischer, semantischer, organisatorischer und rechtlicher Ebene unterstützen. Vor diesem Zusammenhang haben sich in den letzten Jahren unterschiedlichste Initiativen gebildet, welche mehr oder weniger eng miteinander verbunden sind, um die benötigte Interoperabilität zu gewährleisten.

Hinweis:

Im Nachfolgenden werden der Vollständigkeit eines „Datenraum-Leitfaden“ halber die wichtigsten Meilensteine der Datenraumentwicklung in Verbindung gesetzt und die resultierenden Architekturmodelle kurz zusammengefasst. Allen, die den technischen Deep-Dive überspringen wollen, empfehlen wir, ab Kapitel 8 weiterzulesen.

5.1 Industrial Data Spaces (IDS) und International Data Space Association (IDSA)

Die Keimzelle industrieller Datenräume war das Forschungsprojekt „Industrial Data Spaces“ der Fraunhofer-Gesellschaft, aus dem das Industrial Data Spaces Reference Architecture Model (IDS-RAM) hervorgegangen ist. In einer zweiten Förderphase wurden das IDS-RAM innerhalb des Forschungsprojektes „Industrial Data Space Plus“ prototypisch implementiert und die Ergebnisse der Industrial Data Spaces Projekte letztlich in der International Data Space Association institutionalisiert [26]. Dieser internationale Verein kümmert sich u.a. um die Weiterentwicklung des IDS-RAM. Zum Zeitpunkt dieser Publikation ist das IDS-RAM 5.0 in Arbeit und das IDS-RAM 4.0 die offizielle und stabile Version [27]. Wenn im Folgenden vom IDS-RAM gesprochen wird, beziehen sich die Aussagen auf das IDS-RAM 4.0. Der Schwerpunkt des IDS-RAM liegt auf der Verallgemeinerung von Konzepten, Funktionen und Gesamtprozessen, die bei der Schaffung

von Datenräumen eine Rolle spielen. Es befindet sich somit auf einer höheren Abstraktionsebene als gängige Architekturmodelle konkreter Softwarelösungen. Die allgemeine Struktur des Referenzarchitekturmodells ist in der folgenden Abbildung 4 dargestellt [28].

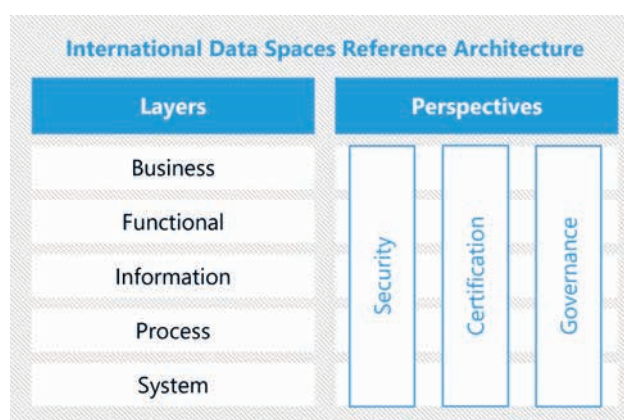


Abbildung 4: Allgemeiner Aufbau des IDS-RAM [28]

Das dargestellte Modell besteht aus fünf Schichten. Die Unternehmensschicht (Business) beschäftigt sich mit den Rollen, die Teilnehmer eines Datenraums einnehmen können und legt für jede Rolle die wichtigsten Aktivitäten und Interaktionen fest. In der Funktionsschicht (Functional) werden funktionale Anforderungen an Datenräume und die daraus resultierenden zu implementierenden Features spezifiziert. Mit der Informationsschicht (Information) wird das Informationsmodell, also die domänenunabhängige gemeinsame Sprache, von Datenräumen beschrieben. Die Prozessschicht (Process) beschäftigt sich mit den dynamischen Interaktionen zwischen Datenraumkomponenten und setzt Abläufe für z.B. das Onboarding in einen Datenraum. Auf der Systemschicht (System) werden die auf der Unternehmensschicht festgelegten Rollen und die auf der Prozessschicht definierten Abläufe in logische Softwarekomponenten abgebildet, was den technischen Kern von Datenräumen bildet. Parallel zu den fünf Schichten beinhaltet das IDS-RAM drei Perspektiven, die allgemeingültig sind: Sicherheit, Zertifizierung und Governance. Weitere Informationen zu Schichten und Perspektiven des IDS-RAM sind unter [28] zu finden. Der Vollständigkeit halber ist noch zu erwähnen, dass die IDSA, neben dem IDS-RAM, weitere Artefakte unter sich hat, wie z.B. das IDSA Rulebook [29]. Es enthält die Grundprinzipien für den

vertrauenswürdigen Datenaustausch über Datenräume und hilft Initiativen dabei, ihre Regeln, Governance-Mechanismen und Rechtsgrundlagen zu definieren. Ziel ist es, folgende Fragen zu klären: Wie richtet man einen Datenraum ein? Was muss unbedingt enthalten sein? Wie kann man ihn vertrauenswürdig gestalten?

5.2 Gaia-X, Gaia-X AISBL und Eclipse Foundation

Eingang bzw. Anwendung hat das entwickelte IDS-RAM unter anderem im Projekt Gaia-X gefunden, aus dem das Gaia-X-Gesamtmodell, auch Gaia-X Framework genannt, resultierte. Die Institutionalisierung und Weiterentwicklung des Gaia-X-Gesamtmodells wurde durch den Verein Gaia-X (Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL) übernommen. Bei dieser Arbeit wird der Verein durch nationale Kontakt- und Arbeitsnetzwerke, sogenannte Gaia-X Hubs, unterstützt. Ihre Aufgabe ist es, das branchenspezifische Anforderungsmanagement an und die Adoption von Datenräumen voranzutreiben.

Das Gaia-X-Gesamtmodell in Abbildung 5 enthält drei Ebenen: Den Gaia-X-Standard, die Gaia-X-Ergebnisse (Deliverables) und der geschäftliche Mehrwert (Business Value). Besonders interessant sind die Gaia-X-Ergebnisse, da diese Ergebnisse das Gesamtmodell konkretisieren. Innerhalb der Gaia-X-Ergebnisse kann das Gaia-X Trust

Framework als zentrales Architekturmodell identifiziert werden. Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Gaia-X Trust Frameworks.

Das Gaia-X-Architekturmodell besteht aus zwei Säulen: Der Einhaltung von Richtlinien (Gaia-X Compliance) und der technischen Komparabilität (Gaia-X Technical Compatibility). Zum Zeitpunkt dieser Publikation gibt es zwei offizielle und stabile Versionen: V2 LOIRE und V3 DANUBE. In einem Compliance Dokument (V2 LOIRE) sind eine Reihe von Richtlinien definiert. Sie sind in einen allgemeinen sowie teilnehmer-, cloud-service- und datenaustausch-spezifischen Satz unterteilt. Durch die dadurch entstehenden Gaia-X-Standardkonformitätsstufen, welche die Mindestanforderungen für die Teilnahme am Gaia-X-Ökosystem definieren, und die Operationalisierung über ein Gaia-X Clearing House soll rechtliche und organisatorische Interoperabilität gewährleistet werden.

Die technische Komparabilität kann durch das Anwenden des Gaia-X Architecture (V3 DANUBE), Data Exchange (V2 LOIRE), Identity Credentials Access Management (V3 DANUBE) und Ontology (V2 LOIRE) Dokument erreicht werden. Das Architecture Dokument liefert Leitlinien für eine technische Umsetzung und beschreibt u. a. zentrale Architekturbausteine wie föderierte Services. Im Data Exchange Dokument werden Prozesse, Regeln und Anforderungen formuliert, damit Teilnehmende Daten austauschen können. Das Identity Credentials Access

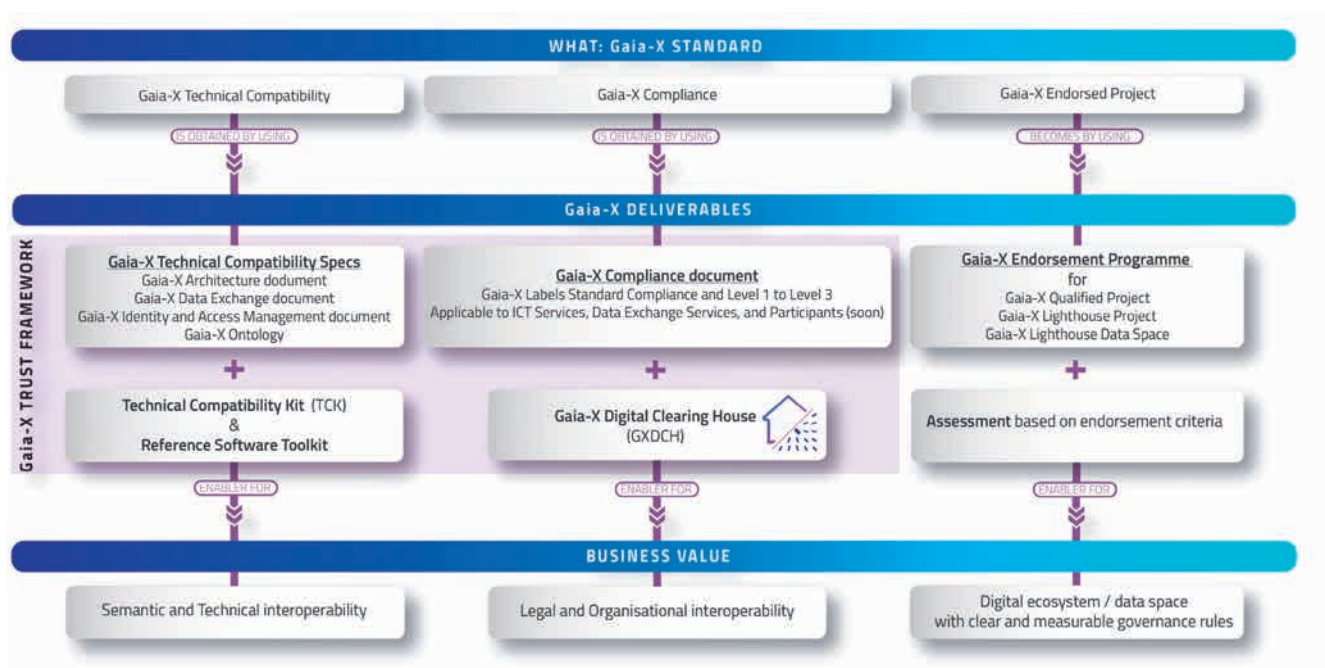


Abbildung 5: Gaia-X Gesamtmodell: Gaia-X Framework [30]

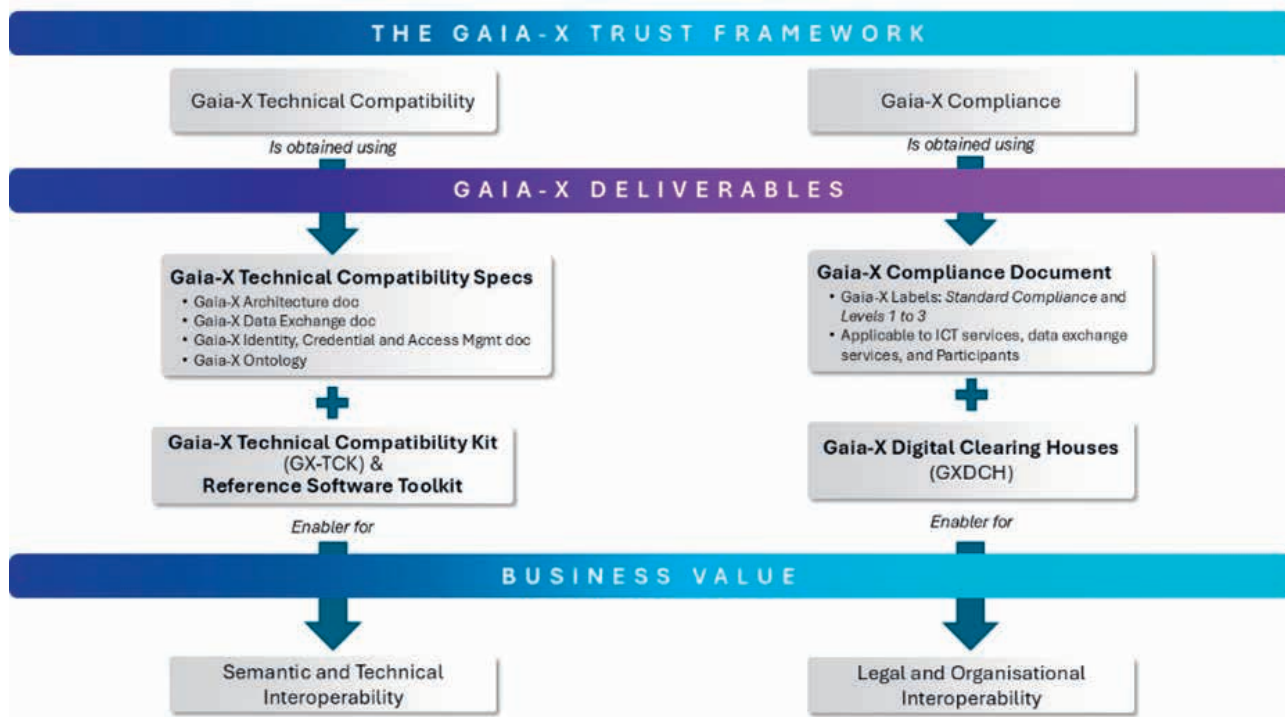


Abbildung 6: Gaia-X-Architekturmodell: Gaia-X Trust Framework [31]

Management Dokument definiert die Spezifikationen für Identität und Berechtigungen. Ziel ist es, dass Teilnehmende sich vertrauenswürdig authentifizieren/autorisieren können. Mit der Ontologie wird das gemeinsame, maschinenlesbare Begriffs- und Bedeutungsmodell geliefert, damit Aussagen einheitlich beschrieben, geprüft und automatisiert verarbeitet werden können. Diese Dokumente, in Kombination mit Komparabilitäts-Kit und Software-Toolkit, sollen für die semantische und technische Interoperabilität sorgen. Im Zusammenhang mit Softwareartefakten ist zu erwähnen, dass neben den Ergebnissen des Gaia-X-Projektes auch Ergebnisse bei der Eclipse Foundation eingespeist wurden. In diesem Zusammenhang sind die Eclipse Dataspace Components (EDC) entstanden und werden seitdem weiterentwickelt. Weitere Informationen zu den EDC sind unter [32] zu finden.

IDSA sowie Gaia-X stellen für sichere, interoperable Datenräume komplementäre technische Rahmenbedingungen. Dabei liefert Gaia-X das oben beschriebene dezentrale Architekturmodell (Gaia-X Trust Framework) und IDSA steuert das IDS-RAM mit spezifischen Entwurfskonzepten bei. Beide Initiativen unterstützen zudem einen gemeinsamen Standard, der ein einheitliches Verständnis von Datenräumen schafft (ISO/IEC 2015).

Zentrales gemeinsames Ergebnis der beiden Initiativen ist ein technischer Standard für den sicheren, interoperablen Austausch von Daten in föderalen Datenräumen vergleichbar bspw. mit dem HTTP-Protokoll im Web, aber speziell für den kontrollierten Datenaustausch zwischen Organisationen, das so genannte Dataspace Protocol (DSP). Das DSP setzt die Prinzipien des IDS-RAM sowie des Gaia-X Trust Framework technisch um und stellt sicher, dass Datensouveränität und Vertrauen beim Datenaustausch gewahrt bleiben. Das Protokoll regelt drei zentrale Aspekte des Datenaustauschs:

- Datenkatalogisierung – Datensätze werden als DCAT-Kataloge veröffentlicht, Nutzungsregeln als ODRL-Policies ausgedrückt
- Vertragsverhandlung – Nutzungsvereinbarungen werden elektronisch und automatisiert ausgehandelt
- Datenzugriff – Datensätze werden über standardisierte Transfer Process Protocols abgerufen

Kern der Implementierung sind standardisierte Connectoren (z.B. der Eclipse Dataspace Connector), die Anbieter und Datennachfrager verbinden. Der Datenaustausch läuft über zwei getrennte Kanäle: einen für Metadaten und einen für die eigentlichen Daten, was hohe Skalierbarkeit ermöglicht. Alle Regeln – Zugriffsrechte, Sicherheit, Abrechnungsmodelle – werden technisch direkt eingebettet und automatisch durchgesetzt (Policy Enforcement). Über das DSP besteht eine weitere Verbindung zur Eclipse Foundation in die Eclipse Dataspace Working Group [33].

5.3 Catena-X, Catena-X e.V. und Tractus-X

Mit Catena-X wurde das erste Umsetzungsprojekt gestartet, welches das Ziel hatte, ein Gaia-X-konformes Ökosystem auf Basis eines Datenraums zu etablieren. Das Projekt baute auf dem Gaia-X-Gesamt- und Architekturmodell auf, welches sich am IDS-RAM orientiert. Um die Ergebnisse des Projektes zu orchestrieren, wurde der Catena-X Automotive Network e.V. gegründet. Der Verein betreibt die Catena-X Library und ist u.a. dafür zuständig, das Open-Source-Software (OSS) Eclipse-Tractus-X-Projekt zu verwalten. Ähnlich wie bei Gaia-X wurden Softwareentwicklungen aus dem Projekt an die Eclipse Foundation übergeben, damit sie dort weiterentwickelt werden können. Tractus-X stellt Referenzimplementierungen sowie KITs (Keep-it-Together) zur Verfügung, um die Entwicklung interoperabler und innovativer Anwendungen und den

Einstieg in das Catena-X-Ökosystem zu beschleunigen [34]. Die Catena-X Library ist die offizielle Dokumentation von Catena-X und gliedert sich in Standard, Regulatory Framework, Operating Model und Working Model. Innerhalb des Operating Model ist die Service Map definiert, welche das Catena-X Operating System (cxOS) als Architekturmodell enthält, wie in der nachfolgenden Abbildung 7 zu sehen ist.

Zum Zeitpunkt dieser Publikation ist CX-Titan die offizielle und stabile Version. Alle folgenden Aussagen zum cxOS beziehen sich auf diese Version. Das in Abbildung 7 dargestellte cxOS basiert auf den Architekturmodellen der IDSA und Gaia-X. Es besteht aus drei Bereichen: Core, Onboarding und Enablement Services. Damit schafft das cxOS die technische Grundlage, um geschäftliche Anwendungsfälle netzwerkfähig über Unternehmensgrenzen hinweg zu betreiben. Dabei werden Enablement Services verwendet, um technische/semantische Interoperabilität sicherzustellen. Jeder Teilnehmer muss seine benötigten Enablement Services selbst einrichten und betreiben. In den Enablement Services sind auch Elemente definiert, welche zum Datenaustausch auf Basis der AAS, nach IEC Standard (IEC 63278), benötigt werden. Die Core Services hingegen werden nicht von den Teilnehmenden selbst, sondern von Core Service Providern eigenrichtet und betrieben. Sie stellen grundlegende Funktionen für Erreichbarkeit und Auffindbarkeit bereit. Dabei wird zwischen A- und B-Services unterschieden. A-Services dürfen

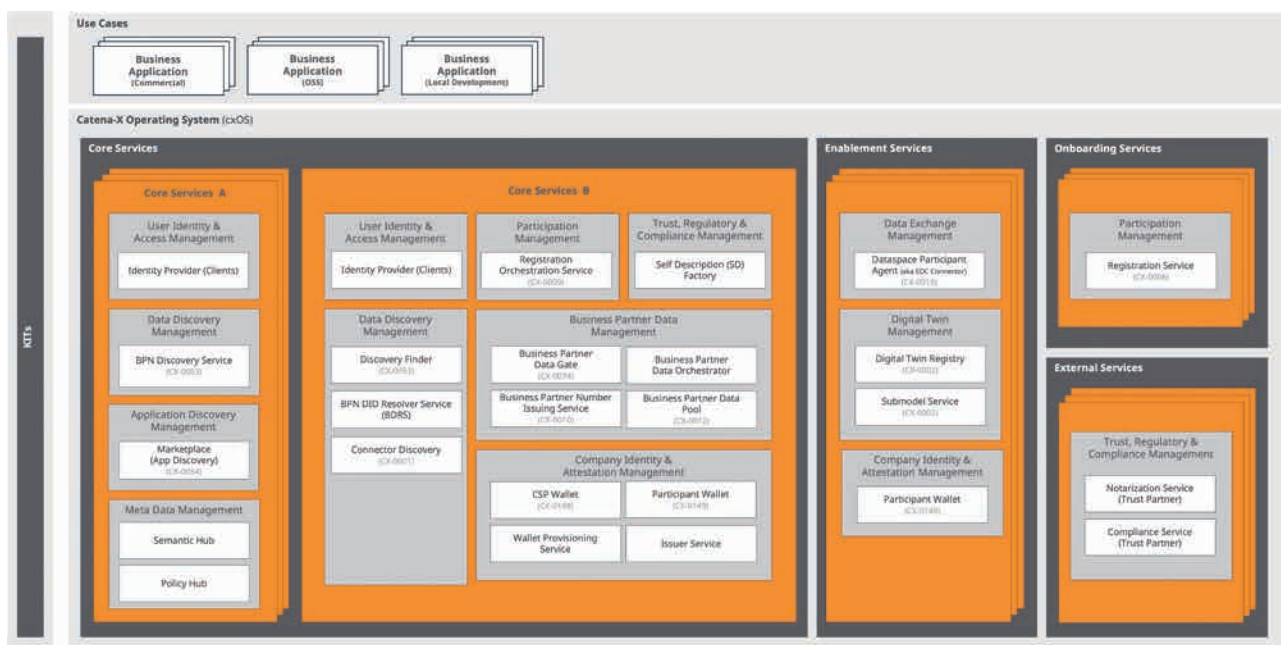


Abbildung 7: Catena-X Service Map mit Catena-X Operating System (cxOS) [35]

n-mal innerhalb eines Datenraums bereitgestellt werden, wohingegen B-Service immer nur einmal verfügbar sein dürfen. Onboarding Services werden von Onboarding Service Providern betrieben und liefern die standardisierten Prozesse, damit Teilnehmende konsistent, compliant und verlässlich dem Catena-X Dataspace beitreten und Enablement- sowie Core-Services nutzen können. Flankiert wird das cxOS durch die oben erwähnten KITS. Es sind in Catena-X standardisierte Entwicklungspakete, die Unternehmen und Softwareentwicklern alle notwendigen Bausteine liefern, um Applikationen für den Catena-X-Datenraum zu bauen oder sich daran anzubinden. Ein KIT bündelt alle relevanten Ressourcen für einen bestimmten Anwendungsbereich und enthält typischerweise standardisierte Schnittstellen für den Datenaustausch (API-Spezifikationen), Semantische Modelle (gemeinsame Datensprache, damit verschiedene Systeme einander verstehen), fertige Code-Beispiele und Open-Source-Komponenten (Referenzimplementierungen) sowie Dokumentation & Leitfäden. KITS ermöglichen es, dass Lösungsanbieter mehrere KITS kombinieren können, um neue interoperable Applikationen und Services zu entwickeln. Datenprovider nutzen KITS, um sich intern an den Catena-X-Datenraum anzubinden – beispielsweise über den Eclipse Dataspace Connector (EDC). Dadurch sinkt der Aufwand für einzelne Unternehmen erheblich, weil das Rad nicht neu erfunden werden muss. Die KITS werden im Open-Source-Projekt Eclipse Tractus-X, dem technischen Fundament von Catena-X, gepflegt und weiterentwickelt. Weitere Informationen zum cxOS, der Service Map und den KITS sind unter [35] zu finden.

Wie schon erwähnt setzt das cxOS auf Artefakten und Architekturmodellen der IDSA und Gaia-X auf. Die Verbindung zwischen dem Catena-X e.V. und den anderen beiden Organisationen ist jedoch nicht unidirektional. Durch die Adoption und Anwendung des Dataspace Protocols und des Gaia-X Trust Frameworks ist der Catena-X e.V. in der Lage, Rückmeldung zu den Artefakten zu geben und damit die Weiterentwicklung mitzuformen. Gleiches gilt für die Zusammenarbeit mit der Eclipse Foundation.

Zusätzlich hat Catena-X aber auch eigene technologische Artefakte geschaffen, die mittlerweile in verschiedenen weiteren Datenraum-Initiativen Anwendung finden. Das Decentralized Claims Protocol (DCP) dient zur Verwaltung von Identitäten und Vertrauensbeziehungen in dezentralen Datenräumen. Das DCP regelt, wie Organisationen ihre digitale Identität und Vertrauensbeziehungen in einem föderalen Datenraum nachweisen. Digitale Ausweise, die eine Organisation eindeutig identifizieren (Identitätstoken), maschinenlesbare, kryptografisch gesicherte Nachweise (Verifiable Credentials (VCs)) und

verschieden Vertrauens-Instanzen (Trust-Anchor), die gleichzeitig genutzt werden können, um Interoperabilität über Datenräume hinweg zu ermöglichen, bilden die drei zentralen Bausteine des DCP. In Catena-X stellt das DCP sicher, dass nur autorisierte und verifizierte Teilnehmer Zugang zum Datenraum erhalten. Bevor zwei Connectoren über das DSP Daten austauschen, prüfen sie gegenseitig ihre Identität und Berechtigungen über das DCP. Es ist damit die Grundlage für Datensouveränität und Zero-Trust-Sicherheit (Zugriff nur nach Kontrolle und nicht automatisch) im gesamten im gesamten Ökosystem [36, 37].

5.4 Common European Data Spaces und Data Space Support Center (DSSC)

Nachdem in verschiedenen Projekten (IDS/IDS+, Gaia-X, Catena-X) unterschiedliche Artefakte entstanden sind, welche auch von verschiedenen Organisationen verwaltet werden, setzte sich die EU im Rahmen der European Strategy for Data das Ziel, beim Entstehen von „Common European Data Spaces“ zu unterstützen. Dafür förderte sie verschiedene Initiativen, die den Aufbau von branchen- und sektorspezifischen Datenräumen unterstützen sollten. Unter Digital Europe und Horizon Europe entstand das Data Space Support Center (DSSC) [38]. Es betreibt eine Unterstützungsplattform, die zur Schaffung gemeinsamer Datenräume beiträgt, indem sie die Bedürfnisse von Datenraum-Initiativen untersucht, gemeinsame Anforderungen definiert und bewährte Verfahren zur Bildung von Datenräumen festlegt [38, 39]. Eines der wichtigsten Artefakte ist der DSSC Blueprint, eine gemeinsame europäische Blaupause für den Aufbau, die Verwaltung und die Skalierung von Datenräumen. Der Blueprint entwickelt nichts Neues, sondern ordnet vorhandene Ansätze ein und macht sie für Datenräume praktisch nutzbar, indem er z. B. das Gaia-X Trust Framework oder das IDSA-Rulebook als Grundlage übernimmt und zusammen mit anderen Artefakten in konkrete Bausteine (building blocks) überführt. Der DSSC Blueprint liegt also eine Abstraktionsebene niedriger und liefert durch die angegliederte Toolbox auch Software. Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung ist der DSSC Blueprint 3.0 die offizielle und stabile Version. Wenn im Folgenden vom DSSC Blueprint gesprochen wird, beziehen sich die Aussagen auf den DSSC Blueprint 3.0 und alle dieser Version angegliederten Artefakte. Eine Übersicht der im DSSC Blueprint definierten Bausteine gibt die nachfolgende Abbildung 8.

Die Bausteine des DSSC Blueprints [39] lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen: Ökonomische und Organisatorische Bausteine (Business and Organisational) sowie Technische Bausteine (Technical). Bausteine der Gruppe

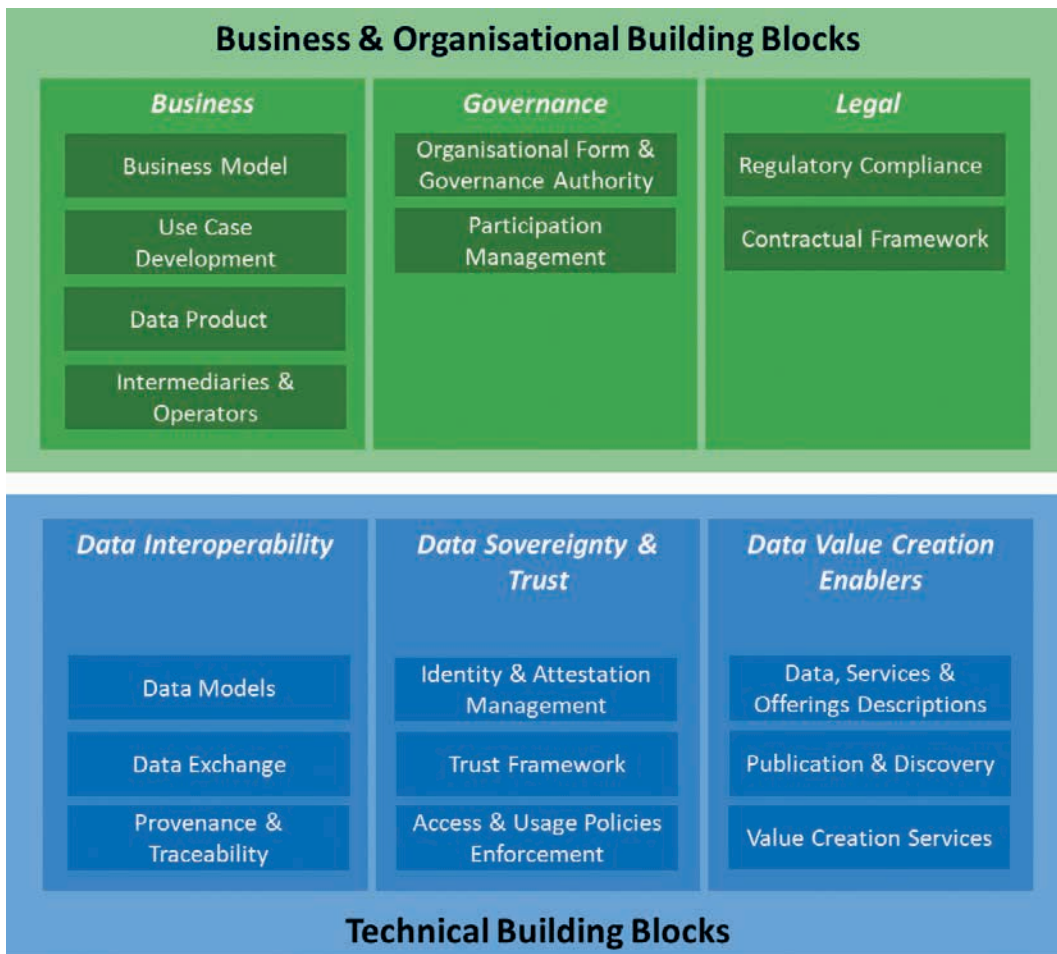


Abbildung 8: Bausteine des DSSC Blueprints [39]

Ökonomisch und Organisatorisch sollen interessierten Initiativen helfen, finanziell nachhaltige, regulatorisch konforme und wertorientierte, datenraumbasierte Ökosysteme aufzubauen. In der Gruppe Technisch sind alle Fähigkeiten enthalten, die für die Implementierung von Datenräumen erforderlich sind. Für die meisten Bausteine enthält der DSSC Blueprint Spezifikationen zur Implementierung. Dort wo sinnvoll, verweisen diese Spezifikationen bereits auf verfügbare andere technische Spezifikationen, deren Verwendung das DSSC empfiehlt. Hier finden sich auch Artefakte wie die EDCs oder Catena-X-Entwicklungen wieder. Nichtsdestotrotz müssen in einigen Fällen domänenspezifische Entscheidungen getroffen werden. Weitere Informationen zu den einzelnen Bausteinen des DSSC Blueprints sind unter [39] zu finden.

5.5 Manufacturing-X, Factory-X und MX-Port

Nachdem mit Catena-X die Entwicklungen von IDSA und Gaia-X für die Automobilindustrie umgesetzt wurden, sollten mit dem Förderprogramm Manufacturing-X die Catena-X-Ergebnisse für die produzierende Industrie adaptiert werden. In der Folge wurden innerhalb von Manufacturing-X verschiedene Projekte für unterschiedliche Branchen der produzierenden Industrie initiiert. Unter diesen Projekten hat das Projekt Factory-X eine Leuchtturmfunktion und ist auch die Heimat des Maschinen- und Anlagenbaus. Factory-X hat neben seinen Use Cases die besondere Aufgabe, eine gemeinsame Basis aus Diensten, Technologie sowie Regeln und Standards für das Entstehen von Manufacturing-X-Datenräumen bereitzustellen, welche – wie schon erwähnt – vorherige Entwicklungen berücksichtigt [40]. Zum Zeitpunkt dieser

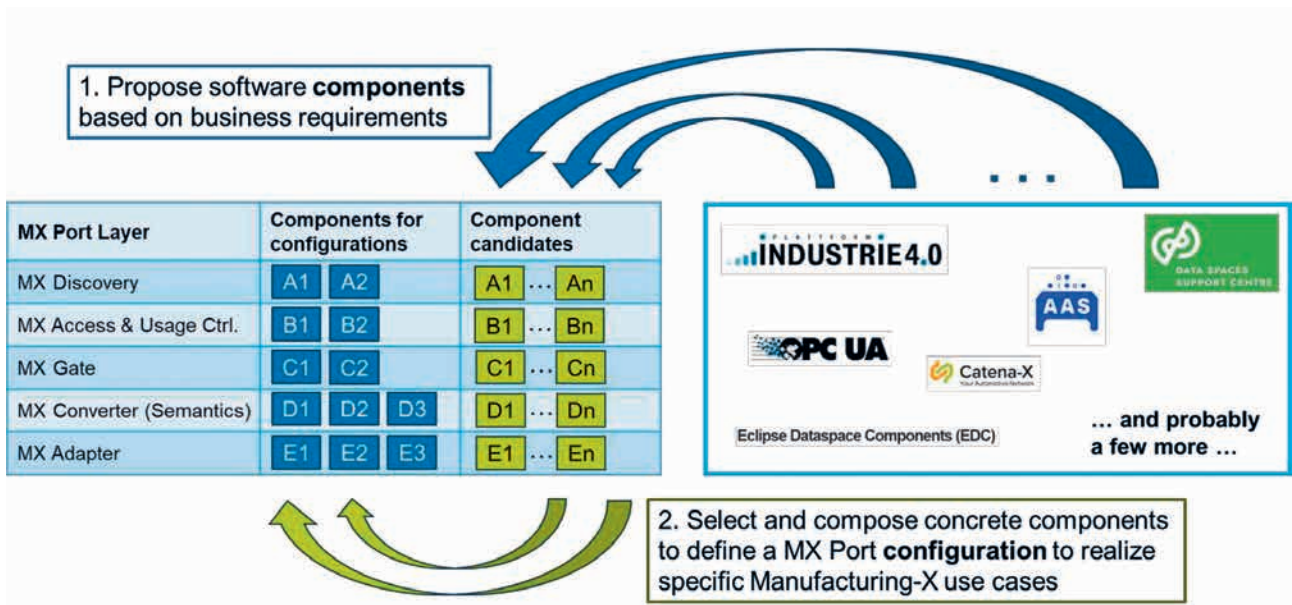


Abbildung 9: MX-Port Konzept [41]

Publikation ist im Rahmen von Factory-X noch kein umfassendes Architekturmodell veröffentlicht worden. Vor dem Hintergrund der bereits geleisteten Arbeit ist auch zu diskutieren, ob so ein Artefakt benötigt wird. Was jedoch in Factory-X entstanden ist und einem Architekturmodell am nächsten kommt, ist das sogenannte MX-Port-Konzept. Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt die Struktur dieses Konzepts.

Der MX-Port besteht aus fünf Schichten. Die oberste Schicht (Discovery) ist dafür da, um Geschäftspartner, Datenangebote oder Geschäftsanwendungen (Services) zu finden. Mit der zweiten Schicht (Access & Usage Ctrl.) wird sichergestellt, dass Datenanbieter den Datenzugriff und die Datennutzung definieren sowie den Zugriff und die Nutzung der bereitgestellten Daten einschränken können. In der dritten Schicht (Gate) sind Artefakte enthalten, um Daten auf einheitliche Weise auszutauschen. Die vorletzte Schicht (Converter (Semantics)) ist, wie der Name schon sagt, dafür zuständig, das semantische Modell für die auszutauschenden Daten bereitzustellen. Mit der untersten Schicht (Adapter) wird bestehenden Systemen Rechnung getragen und die Möglichkeit gegeben, Geschäftsanwendung anzubinden.

In Abbildung 10 ist gut zu erkennen, dass das MX-Port-Konzept keine neuen Grundlagen entwickelt, sondern auf Artefakten von bereits erwähnten oder anderen Organisationen aufsetzt. Abhängig davon, wie die unterschiedlichen Schichten mit Artefakten gefüllt werden, ergeben sich unterschiedliche Konfigurationen des MX-Ports. Die nachfolgende Abbildung zeigt die aktuell diskutierten Konfigurationen und ordnet sie Anwendungsszenarien zu.

In Abbildung 10 wurden einige Schichten zusammengefasst, wenn sie von einem Artefakt abgedeckt werden. So wie zum Beispiel bei der Leo Konfiguration Access & Usage Ctrl. Gate und Converter durch die AAS abgedeckt werden und somit eine Verbindung zur Industrial Digital Twin Association (IDTA) herstellen. Ähnlich bei der Hercules Konfiguration, wo Gate und Converter auch auf der AAS basieren. In diesem Fall wird sie aber mit dem DSP der IDSA und dem Decentralized Claims Protocol (DCP) für Discovery sowie Access & Usage Ctrl. kombiniert. DSP und DCP sind auch feste Bestandteile des DSSC Blueprints. Für die Orion-Konfiguration, welche für Shopfloor orientierte Szenarien und den Austausch von kontinuierlichen Daten zusammengestellt wurde, wurde die AAS durch OPC UA als Gate und OPC UA Companion Specifications als Converter Artefakt ausgetauscht. Somit stellt die Orion-Konfiguration die Verbindung zur OPC Foundation, umati und den VDMA-Aktivitäten zur Weltsprache des Maschinenbaus dar.

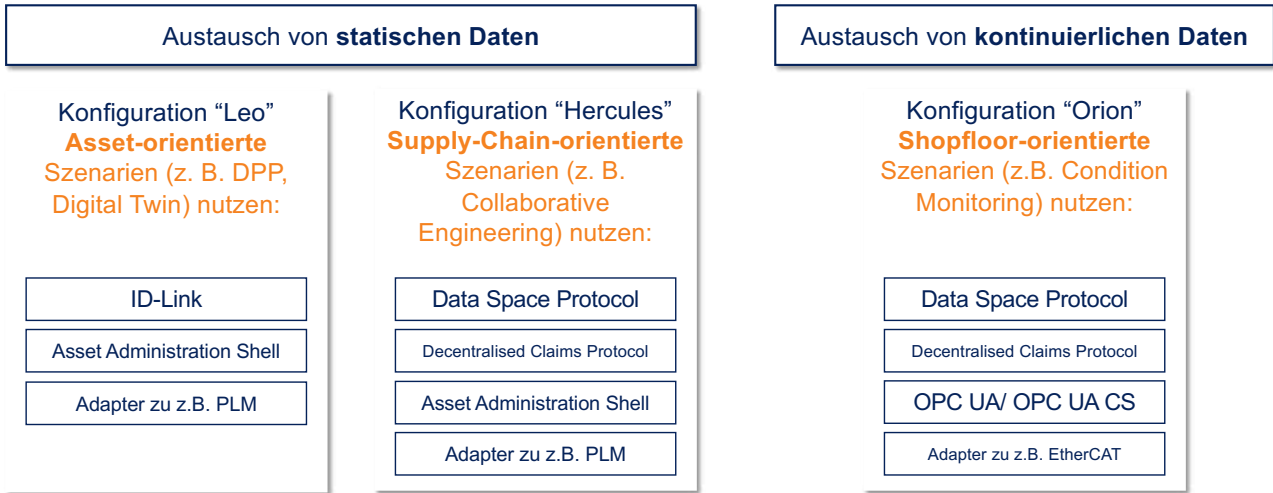


Abbildung 10: MX-Port Konfigurationen

5.6 Einordnung zentraler Entwicklungen und Zusammenhänge im Datenraum-Kontext

In diesem Kapitel wurden die Entwicklung des Datenraums, im Zusammenhang mit Förderrichtlinien, Projekten, Architekturmodelle und anderen Artefakten sowie Institutionalisierungen, beschrieben und in Verbindung gesetzt.

Die nachfolgende Grafik gibt einen abschließenden Gesamtüberblick und zeigt die wichtigsten Verbindungen auf. Es ist zu beachten, dass die dargestellte Reihenfolge nicht unbedingt die Chronologie widerspiegelt, da sich einige Aktivitäten überlappten oder dies noch tun. Auch enthält die Grafik nur den „Downstream“ und Feedback-Schleifen wie z.B. vom Catena-X e.V., der DSP ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht enthalten.

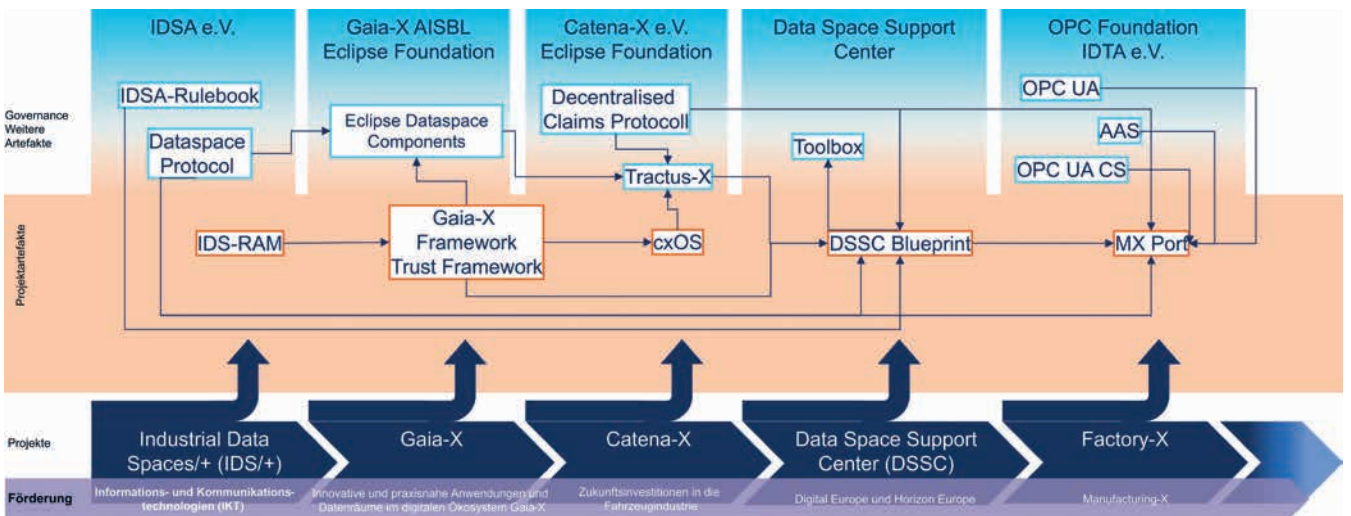


Abbildung 11: Überblick

6. Technische Grundlagen industrieller Datenräume

Wie in Kapitel 2 und 5 erwähnt wurde, variieren konkrete Implementierungen von Datenräumen. Dennoch gibt es einen Satz an Komponenten und Diensten, die in jeder Datenraumimplementierung vorhanden sein müssen und auch jeweils eine Entsprechung in den unterschiedlichen Architekturmodellen haben. Diese Menge eignet sich gut, um die technischen Grundlagen von industriellen Datenräumen näher zu betrachten. Im Folgenden geht es um:

- Identitäten
- Konnektoren (inkl. Usage/Access-Control-Mechanismen)
- und Föderationsdienste (inkl. Datenkataloge)

6.1 Identitäten

Obwohl in technischen Diskussionen häufig über Konnektoren, Semantik und Syntax gesprochen wird, sind es vor allem die Identitäten und ihre technische Realisierung, welche einen kontrollierten, vertrauensvollen und offenen Datenaustausch über Datenräume ermöglichen. Sie sind der Anker für Vertrauen und ihre Akzeptanz sowie Verbreitung entscheiden darüber, ob Datenräume Silos aufbrechen oder selbst zu welchen werden. Dabei bilden Identifikation (eine Identität beanspruchen), Authentifizierung (diese Identität nachweisen) und Autorisierung (Zugriffsrechte festlegen) einen mehrstufigen Prozess, der sich über zwei Ebenen erstreckt. Zum einen die Identität eines Unternehmens als Teilnehmer des Datenraums (Organisationsidentität, juristische Person) und zum anderen die Identität bzw. Rollen einzelner Nutzender (Nutzeridentität, natürliche Person). Nur durch das Zusammenspiel dieser beiden Ebenen können Verantwortlichkeiten und Rechte in Datenräumen sauber abgebildet werden. Nutzeridentitäten kommen dort zum Einsatz, wo innerhalb eines Unternehmens oder eines Services der Zugriff rollenbasiert verwaltet werden muss. Das kann z.B. ein Portal oder eine API sein, über welche die Mitglieder einer Organisation verschiedene Handlungsoptionen haben. So können sie, den im weiteren Verlauf näher erläuterten, Konnektor verwalten, neue Nutzungs- und Zugriffsbedingungen anlegen oder nach Datenangeboten suchen und diese verhandeln. Die Organisationsidentität kommt immer dann zum Einsatz, wenn es zur

unternehmensübergreifenden Kooperation kommt und Zugriffe auf Datenangebote gewährt oder abgelehnt werden sollen.

Bei Identitäten wird im Allgemeinen zwischen hoheitlichen und nicht-hoheitlichen digitalen Identitäten unterschieden. Hoheitliche Identitäten werden von staatlichen Stellen ausgegeben wie z.B. bei einem Personalausweis mit Online-Funktion. Hingegen werden nicht-hoheitliche Identitäten von nichtstaatlichen Stellen vergeben. Unabhängig von der Ausstellungsart lassen sich digitale Identitäten in isolierte, zentrale und dezentrale Identitäten unterteilen. Dezentrale Identitäten werden häufig auch als Self-Sovereign Identities (SSI) bezeichnet [42].

6.1.1 Nutzeridentitäten isoliert, zentral und föderiert

In den meisten Fällen kommen isolierte, zentrale und föderierte Identitäten im Zusammenhang mit Nutzeridentitäten zum Einsatz. Diese sind in den seltensten Fällen hoheitlich und werden von einem Identitätsanbieter ausgestellt, welcher dann nicht nur bei der Ausstellung, sondern auch bei der Nutzung der Identität eingebunden ist. Der Identitätsanbieter (Issuer) verfügt über sämtliche Informationen zu den Identitäten und wird von der Partei (Verifier), welche die Verifizierung durchführt, kontaktiert, wenn er die Identität des zu verifizierenden Teilnehmers (Holder) bestätigen haben möchte. So weiß der Issuer zu jeder Zeit, wer mit wem in Kontakt ist. Wenn nun jede Anwendung, sprich jedes Portal oder jeder Service, seine eigene Identität ausstellt, spricht man von isolierten Identitäten. Kann eine Identität zur Authentifizierung und Autorisierung bei mehreren Anwendungen verwendet werden, ist von zentralen Identitäten die Rede. Besteht die Möglichkeit, die Identität nicht nur von einem, sondern mehreren Identitätsanbietern ausgestellt zu bekommen, dann wird dies als föderierte Identität bezeichnet. Der Ansatz von zentralen oder föderierten Identitäten ist durch verschiedene Kommunikationsstandards wie OpenID-Connect und OAUTH2.0 weitestgehend standardisiert und etabliert [42]. Im Bereich der föderierten Identitäten ist auch der Single-Sign-On (SSO) verankert, welcher föderierte Identitäten aus Sicht der Nutzer beschreibt [43] und im oberen Bereich von Abbildung 12 dargestellt ist. Aber auch bei föderierten Identitäten ist der Identitätsanbieter in die Nutzung der Identität eingebunden. Grundsätzlich wäre

es möglich, eine zentrale oder föderierte Identität auch auf der Ebene der Organisationidentitäten zu verwenden. Dies würde aber dem grundsätzlichen dezentralen Konzept

von Datenräumen widersprechen, weshalb sie eher als Zwischenschritt bzw. Mittel zum Zweck auf dem Weg zu dezentralen Identitäten eingesetzt werden sollten.

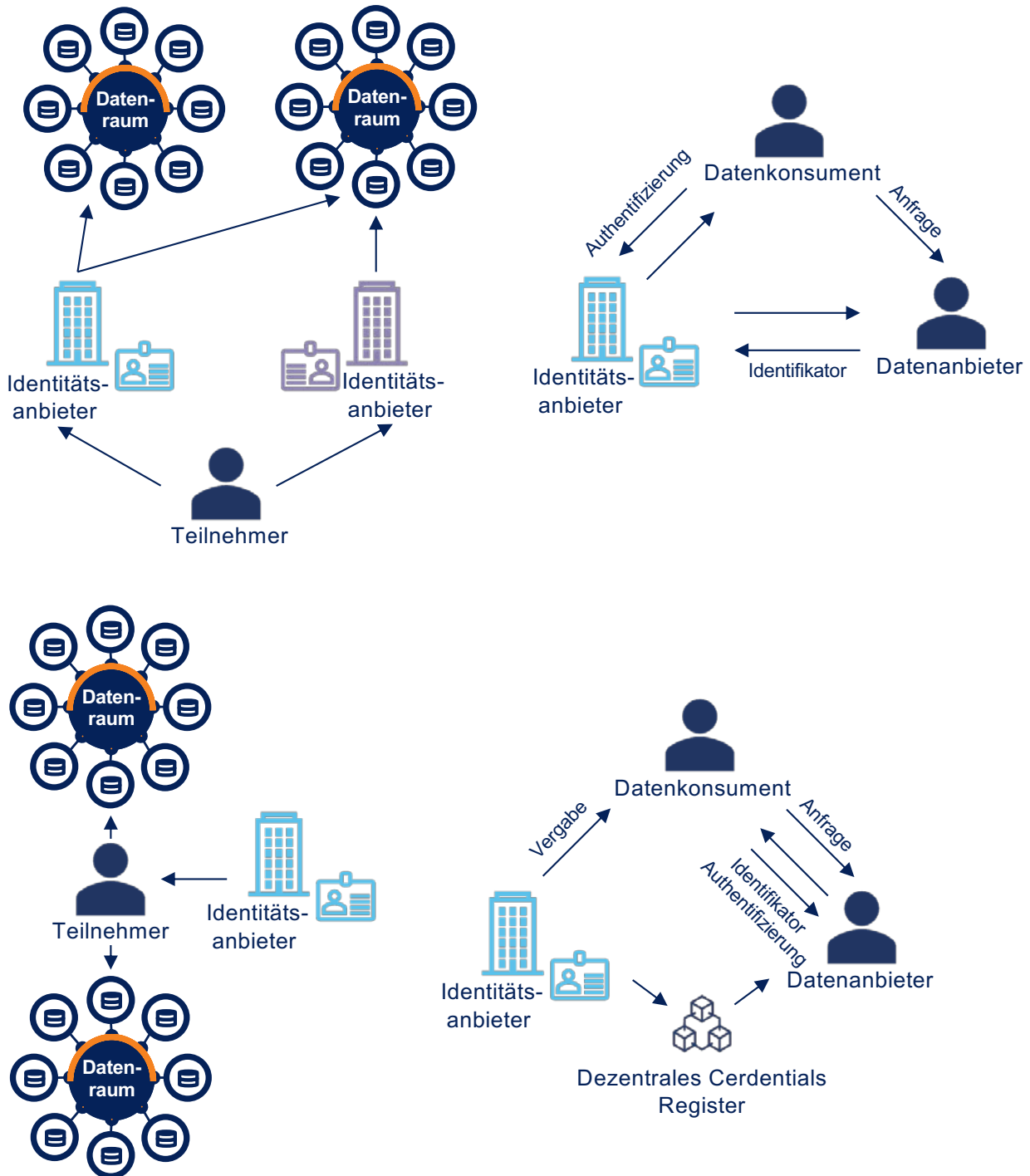


Abbildung 12: Zentrale und föderierte (oben) vs. dezentrale und selbstsouveräne Identitäten (unten) [43]

6.1.2 Organisationsidentität, dezentral und selbstsouverän

Dezentrale Identitäten bzw. SSI werden eingesetzt, um die Identität von Unternehmen im Datenraum abzubilden. Dabei wird, im Gegensatz zu den isolierten, zentralen und föderierten Identitäten, die Identität nicht durch den Identitätsanbieter, sondern durch den Holder verwaltet und kontrolliert. In diesem Zusammenhang ist auch der Einsatz von hoheitlichen digitalen Identitäten denkbar, wie z.B. die geplante EU eID und dazugehörige EUDI-Wallet (eIDAS Verordnung 2.0 [44]). Nach Herausgabe der Nachweise durch eine hoheitliche oder nicht-hoheitliche Stelle erlauben SSIs es den Holdern, sich gegenseitig im Datenraum zu identifizieren, ohne dass es der Erlaubnis eines Vermittlers oder einer zentralen Partei bedarf. Sie geben die Kontrolle darüber, wie die persönlichen Daten geteilt und verwendet werden, in die Hand der Teilnehmer. Erreicht wird dies dadurch, dass bestätigte bzw. zertifizierte Informationen zu einer Identität vom Identitätsanbieter beim Ausstellen der Identität in das System übertragen werden. Ein Verifier kann die zu bestätigenden Informationen dann direkt vom Holder erhalten und mittels systemisch hinterlegter Informationen abgleichen [42]. Eine Möglichkeit, das Konzept von dezentralen Identitäten umzusetzen, ist der Einsatz von Verifiable Credentials (VCs). Es handelt sich dabei um bestätigte bzw. zertifizierte Informationen zu einer Identität, die im System hinterlegt sind. Der Prozess zur Verwendung von VCs ist im unteren Bereich von Abbildung 12 dargestellt. Der Issuer stellt dem zu verifizierenden Teilnehmer (Holder) zu seiner Identität ein oder mehrere VCs aus, welche dieser in seiner Wallet hält und bei Bedarf als Verifiable Presentation vorzeigt. Außerdem speichert der Identitätsanbieter Informationen/Status über die VCs in einem dezentralen Register (Verifiable Data Registry). Die Partei (Verifier), welche die Verifizierung durchführt, fordert vom Teilnehmer die Verifiable Presentation an und prüft kryptografisch Signatur und Gültigkeit mit Hilfe der Informationen im dezentralen Register [45].

Eine Vorstellung, wie dezentrale Identitäten bzw. SSI im Zusammenhang mit Datenräumen aussehen können, liefert das Automobilnetzwerk Catena-X. Der Einsatz von SSI unter Verwendung von VCs ist im Catena-X-Standard als zu verwendender Ansatz definiert. Es ist jedoch auch erwähnt, dass das SSI-Konzept von Catena-X noch in der Entwicklung ist [46]. Aktuell erstellt Cofinity-X, die Betreiberorganisation des Catena-X Datenraum, neuen Teilnehmern im Rahmen des Onboardings ein Wallet, welches für die Identitätsverwaltung des Unternehmens und die Konnektorkommunikation unerlässlich ist. Die Teilnehmer erhalten VCs (Business Partner Number Credential und Membership Credential), welche im von Cofinity-X verwalteten Wallet gespeichert werden [47]. Somit ist

Cofinity-X als Core Service Provider durch die Überprüfung von Identitäten in den Datenaustauschprozess mit eingebunden. In den kommenden Veröffentlichungen des Catena-X-Standards soll das existierende SSI-Konzept so angepasst werden, dass es modularer und flexibler wird. Teilnehmer können dann ihre eigene Wallet im Datenraum verwenden und Unternehmen unabhängig von ihrer Rolle Berechtigungsnachweise ausstellen, vorlegen und überprüfen, wodurch ein zunehmendes Maß an Interoperabilität mit der Außenwelt gegeben sein wird [46].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vorteile von zentralen bzw. föderierten Identitäten in ihrer einfachen Integration und durch SSO verstärkten komfortablen Nutzung liegen. Zu den Nachteilen zählt die geringe digitale Souveränität, weil der Identitätsanbieter bei jeder Nutzung eingebunden ist und dadurch Profile/Tracking und datengetriebene Geschäftsmodelle begünstigt werden. Außerdem sind sie oft schwer in Wallet-Systeme integrierbar und das Sicherheitsniveau hängt stark vom Design ab [42].

Wie schon erwähnt setzen dezentrale Identitäten bzw. SSI genau bei dem ersten Nachteil von zentralen bzw. föderierten Identitäten an. Ihr Vorteil ist, dass der Identitätsanbieter keine zentrale Rolle bei der Nutzung spielt. Nutzende behalten mehr Kontrolle und können relevante Informationen nur selektiv weitergeben. Nachteile sind der frühe Reifegrad, dass die Umsetzung bzw. Integration aufwändiger ist und es noch einige ungelöste Fragen gibt [42].

6.2 Konnektoren

Während Identitäten den Anker für Vertrauen und Verantwortlichkeiten im Datenraum bilden, ist der Konnektor die technische Instanz, die dieses Vertrauen „in Aktion“ übersetzt: Er verbindet Teilnehmer über Organisationsgrenzen hinweg, ist also das technische Gateway eines Teilnehmers in den Datenraum. Um die technischen Grundlagen von Konnektoren zu verstehen, muss erst definiert werden, was ein Konnektor überhaupt ist, weil der Begriff von verschiedenen Initiativen unterschiedlich verstanden wird [48]. Um Missverständnisse in diesem Zusammenhang zu vermeiden, spricht der DSSC Blueprint nicht von Konnektoren, sondern von sogenannten „Participant agents“, also einer Sammlung von sauber definierten Funktionen, die ein Teilnehmer braucht, um am Datenraum partizipieren zu können. Zu diesen Funktionen zählen:

1. Das Handhaben von Nachweisen und Berechtigungen: Gehört das Unternehmen zum Datenraum? Erfüllt es bestimmte Eigenschaften? Kann es die erforderlichen Nachweise erbringen? Lassen sich im umgekehrten Fall fremde Nachweise prüfen?

2. Das Sichtbar- und Auffindbarmachen von Datenangeboten: Datenprodukte werden nicht einfach „freigegeben“, sondern zunächst über Metadaten beschrieben und in einer Form veröffentlicht, die andere Teilnehmer abrufen können.
3. Das Veröffentlichen von Nutzungs- und Zugriffsbedingungen und das anschließende Abgleichen mit einem Interessenten: Es findet ein Aushandlungsprozess statt, in dem die Bedingungen von Anbieter und Nachfrager zusammengeführt werden und am Ende eine Entscheidung fällt, ob Zugriff gewährt wird.
4. Das Transferieren von Daten: Ist die Nutzung eines Datenangebots vereinbart, muss der Austausch technisch abgewickelt werden. Dabei geht es nicht nur darum, „irgendwie Daten zu senden“, sondern den Transfer kontrolliert zu starten, zu steuern und nachvollziehbar zu machen. Der eigentliche Datenpfad kann je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich aussehen: Daten können als Datei, über eine API, als Stream oder über domänenspezifische Schnittstellen bereitgestellt werden.

Somit wird der Konnektor im weiteren Verlauf weniger als einzelnes, klar abgegrenztes Produkt verstanden, sondern als eine technische Zusammenstellung von Funktionen, die ein Akteur für die Teilnahme am Datenraum benötigt. Welche Software diese Funktionen konkret bereitstellt und

ob sie in einer Anwendung gebündelt oder auf mehrere Dienste verteilt sind, kann je nach Initiative und Umsetzung variieren. Gleichzeitig existieren im Umfeld von Datenräumen weitere Komponenten, die in der Praxis häufig mit dem Begriff „Konnektor“ vermischt werden, obwohl sie nur einzelne Aufgaben abdecken. Dazu gehören etwa Dienste zur Auffindbarkeit und Zuordnung von Angeboten oder Endpunkten sowie Mechanismen, die lediglich einen Verweis auf Informationen oder Systeme bereitstellen. Für die folgenden Ausführungen wird der Begriff Konnektor daher nur für solche Lösungen verwendet, welche den Großteil der oben beschriebenen Funktionen tatsächlich bereitstellen [48]. Neben diesen Funktionen macht der DSSC Blueprint noch eine wichtige Aussage in Bezug auf Konnektoren. Er teilt die beteiligten Softwarekomponenten in zwei Ebenen auf: Datenebene (Data Plane) und Kontrollenebene (Control Plane). Die Control Plane übernimmt die Steuerungsaufgaben rund um den Datenaustausch: Sie entscheidet, wie Daten gemanagt, geroutet und verarbeitet werden, während die Data Plane die eigentliche Übertragung übernimmt. Während des Transferprozesses bleibt die Control Plane mit der Data Plane gekoppelt, um die Einhaltung der vereinbarten Regeln zu unterstützen [49]. Für die Aufgaben der Control Plane liefert das DSP die benötigten standardisierten Interaktionen. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt, welche Funktionen durch das DSP abgedeckt werden und korreliert somit mit den oben aufgeführten Punkten 1-3.

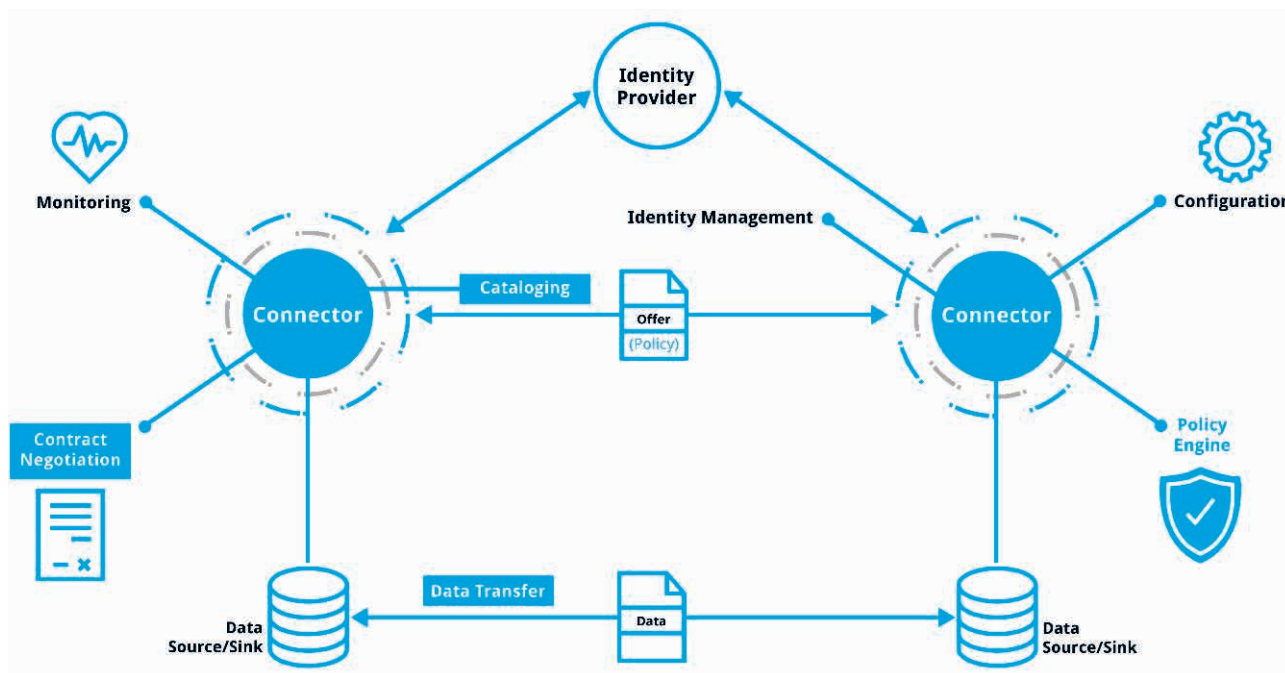


Abbildung 13: Data Space Protocol [50]

Die IDSA spezifiziert die Eclipse Dataspace Components als DSP-konforme Implementierung der in Abbildung 13 dargestellten Funktionen, weist aber auch darauf hin, dass andere Implementierungen zulässig sind [50]. So existiert der Data Space Connector Report [51], um einen Überblick über die anderen Implementierungen zu bekommen und ihre Konformität zu bewerten. Dieses Dokument ist bei der Frage, welche verschiedenen Implementierungen existieren, zu Rate zu ziehen. Für das Verständnis der technischen Grundlagen wird im Folgenden die eben erwähnte Eclipse Dataspace Components Implementierung genutzt, da auch verschiedene Implementierungen auf dem „Basis“-Konnektor der EDC fußen. Die nachfolgende Abbildung 14 zeigt die Operationen, die auf der Control Plane durchgeführt werden.

Zuerst fordert die Control Plane des Consumers die Datenangebote (Assets) des Anbieters an. Die Katalogabfragen werden über HTTP POST gestellt. Die Control Plane gibt eine Antwort zurück, die einen DCAT-Katalog [53] enthält. Diese Informationen werden dann für die Aushandlung von Verträgen verwendet. Ein Vertrag stellt ein Artefakt dar, welches als Token fungiert und Zugriff auf einen Datensatz gewährt. Der Vertrag codiert eine Reihe von Richtlinien (Policies) unter Verwendung der Open Digital Rights Language (ODRL) [54] und ist über seine Identität an den Consumer gebunden. Daher muss auch jede Control Plane mit einer eindeutigen Kennung verbunden sein, die datenraumspezifisch sein kann. Häufig handelt es sich um eine Web-DID,

wenn das Deentralized Claims Protocol (DCP) als Identitätssystem verwendet wird wie z.B. im Zusammenhang mit Catena-X. Nach Abschluss eines Vertrages kann der Consumer die Datenübertragung initiieren. Dabei wird der Datenfluss von der Control Plane gesteuert, ohne die Daten direkt zu senden. Mit der Control Plane kann über eine Management-API interagiert werden. Es ist eine RESTful API, welche es dem „Eigentümer“ der Control Plane erlaubt, z.B. neue Richtlinien zu definieren oder eine bestimmte Data Plane auszuwählen [52, 55]. Wie bereits erwähnt, findet die eigentliche Datenübertragung über die Data Plane statt, wobei ein separates Wire Protocol verwendet wird. Eine Control Plane kann mehrere Data Planes verwenden. Für die eben angesprochene Definition von Richtlinien wird die schon erwähnte ODRL verwendet. Werden Assets und Policies kombiniert, entstehen die angesprochenen Verträge. Weitere Informationen zu der Funktionsweise der Control Plane sind unter [52] zu finden.

Auch der oben angesprochene Übertragungsprozess wird unter Verwendung der Management-API initiiert. Der endliche Übertragungsprozess endet, nachdem die Daten übertragen wurden, der fortlaufende Übertragungsprozess wird z.B. über einen Stream oder Zugriff auf einen API-Endpunkt aufgebaut. Unabhängig von der Dauer der Übertragung, unterstützt der EDC Connector zwei Arten des Datenflusses: Consumer Pull und Provider Push. Beide sind nachfolgend dargestellt.

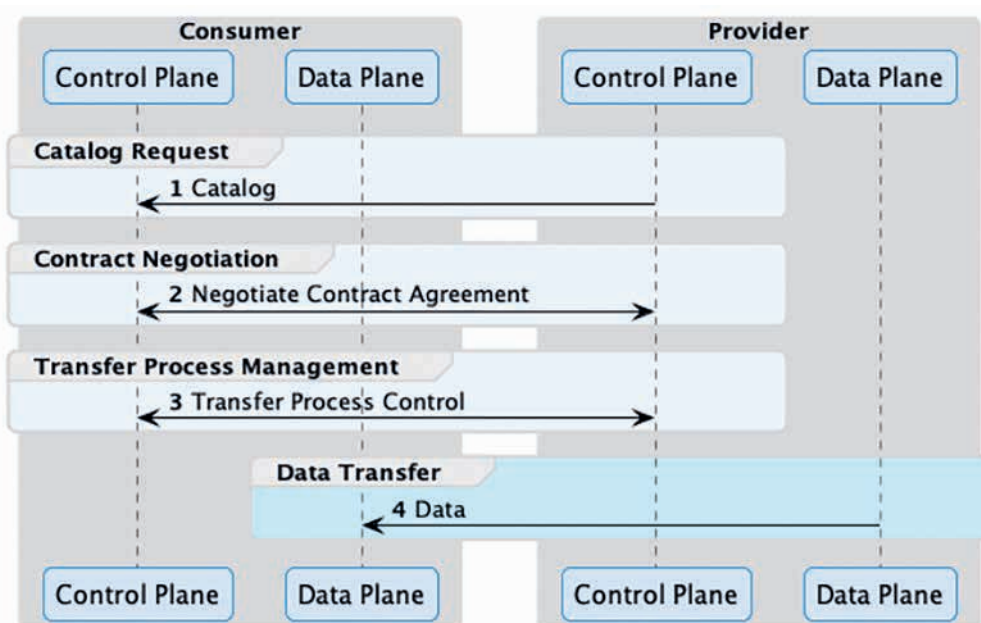


Abbildung 14: Hauptoperationen Control Plane EDC [52]

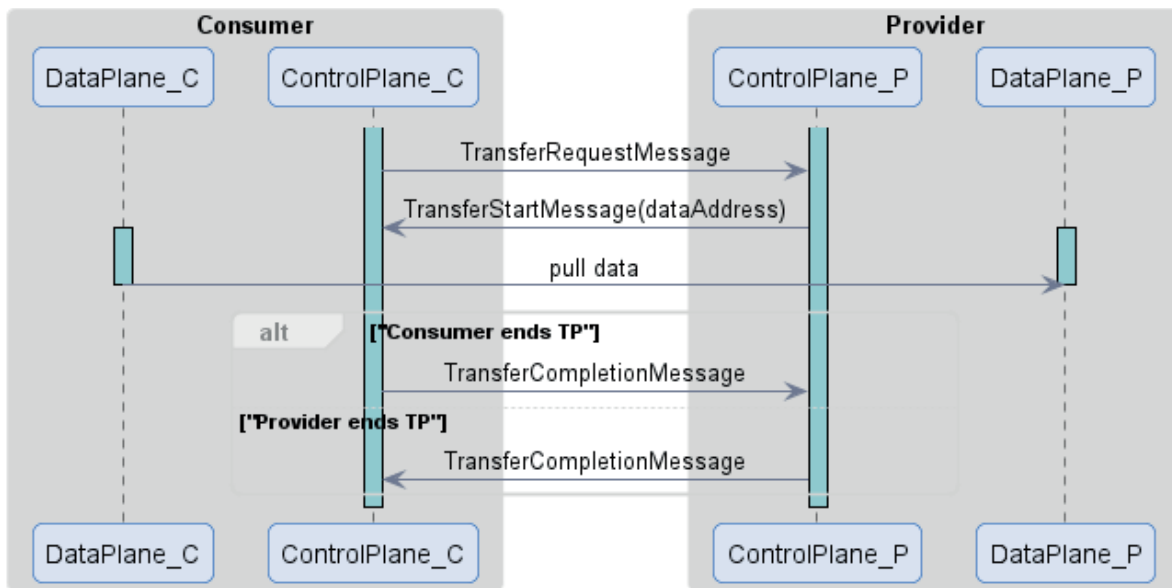


Abbildung 15: Consumer Pull [52]

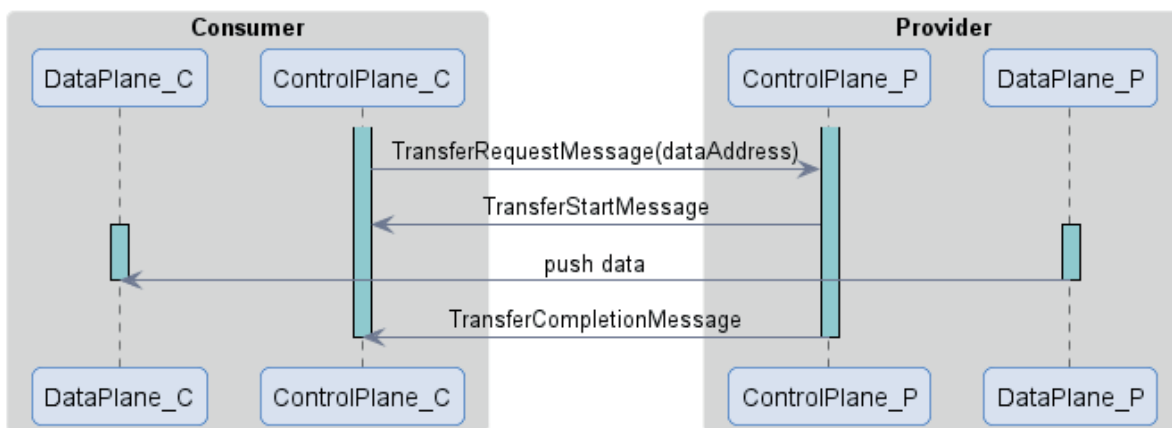


Abbildung 16: Provider Push[52]

Der Consumer Pull erfordert, dass der Datentransfer vom Consumer gestartet wird und kann somit auch als Default angesehen werden. Ein gängiges Beispiel hierfür ist ein HTTP Request an einen Endpunkt. Als Ergebnis dieses Request erhält dann der Consumer eine EDR (Endpoint Data Reference). Die EDR enthält die „Koordinaten“ eines öffentlichen Endpunkts des Providers, an dem die Daten abgerufen werden können. Beim Provider Push muss der Provider die Daten aktiv an den Consumer übertragen. Das bedeutet auch, dass die Data Plane des Consumers die Aufgabe hat, den Zielpunkt vorzubereiten. Da dies möglicherweise etwas Zeit benötigt, sendet der Consumer bei der Einleitung eines Übertragungsprozesses ein Zugriffstoken. Der Provider verwendet dieses Token, um die Daten zu übertragen, sobald sie bereit sind.

Nachdem nun geklärt ist, was sich hinter dem Begriff Konnektor bzw. Participant Agent versteckt, ist aus technischer Sicht noch interessant, wo diese Softwarekomponenten bzw. die Sammlung an Funktionen „leben“. Grundsätzlich liegt die Beantwortung dieser Frage in der Verantwortung der Teilnehmer. Das IDS-RAM gibt in der Hinsicht aber einige Orientierung, welche nachfolgend beschrieben ist [8]. Grundsätzlich muss ein Konnektor von außerhalb der Organisation, über das Internetprotokoll (IP), erreichbar sein, da der Datenraum sich aus der Gesamtheit der Konnektoren bildet. Wenn die Organisationsrichtlinien es verlangen, kann auch eine demilitarisierte Zone (DMZ), also ein Computernetz mit sicherheitstechnisch kontrollierten Zugriffsmöglichkeiten auf die daran angeschlossenen Server, eingerichtet werden. Außerdem lässt das IDS-RAM

die Option, dass ein Unternehmen mehrere Konnektoren nutzen kann, um Anforderungen an Lastenausgleich oder Datenpartitionierung zu erfüllen. Die Konnektoren können entweder innerhalb der eigenen Infrastruktur und Betriebsverantwortung (On-Premises/Self-Hosted) oder als Dienstleistung durch einen Anbieter (As-a-Service) betrieben werden. In beiden Betriebsmodellen können Konnektoren wahlweise nahe an der Datenquelle (Edge) oder zentral in einer Cloud-Umgebung (Cloud) platziert werden.

6.3 Föderationsdienste

Föderationsdienste sind jene gemeinsamen (oder interoperabel gekoppelten) Infrastruktur- und Vertrauensdienste eines Datenraums, die Teilnehmer- und Ressourcen-Souveränität praktisch umsetzbar machen. Entsprechend dem DSSC Blueprint entsprechen sie einer von drei Arten von Services im Datenraum. Mit dem oben beschriebenen Participant Agent und den dazugehörigen Funktionen wurde die erste Art von Services (Participant Agent Services) abgedeckt. Die dritte Art von Services (Value Creation Services) wird hier nicht weiter betrachtet [56]. Diese Gruppe von Services wird für die grundsätzliche Funktionsweise eines Datenraums nicht benötigt. Im weiteren Verlauf werden die Föderationsdienste als zweite Art von Services (Federation Services) genauer beschrieben.

Im Zusammenhang mit Föderationsdiensten ist zu beachten, dass sie zentrale Elemente in einem dezentralen System sind. Auch wenn Teilnehmer des Datenraums weiterhin ihre eigenen Daten verwalten und selbst entscheiden können, ob sie diese mit anderen Teilnehmern teilen möchten oder nicht, kann es weiterhin Bedarf an zentralen Diensten geben, die das Zusammenspiel der Teilnehmer erleichtern. Nach dem DSSC Blueprint gibt es fünf Hauptkategorien von Föderationsdiensten:

1. Data Space Registry
2. Validation and Verification Services
3. Policy Information Point Services
4. Catalogue Services
5. Vocabulary Services

6.4 Observability Services

Die Data Space Registry übernimmt dabei die Funktion eines gemeinsamen Verzeichnisses im Datenraum. Es sorgt dafür, dass relevante Teilnehmer, Dienste oder andere datenraumbezogene Artefakte registriert und damit im föderierten Gesamtsystem referenzierbar werden. Die Validation and Verification Services prüfen dagegen Nachweise, Credentials und andere Vertrauensinformationen, sodass Identitäten, Eigenschaften oder Konformitätsaussagen technisch verifiziert werden können. Die Policy Information Point Services liefern zusätzliche Informationen für Policy-Entscheidungen, also Kontextdaten, die bei der Bewertung von Zugriffs- und Nutzungsrechten benötigt werden. Die Catalogue Services haben die Aufgabe, Datenprodukte, Angebote oder Teilnehmer im Datenraum auffindbar zu machen, indem sie entsprechende Metadaten bereitstellen und für Such- und Discovery-Prozesse nutzbar machen. Dabei greifen sie auf Informationen zu, welche in den Konnektorkatalogen enthalten sind und machen sie dadurch einfach nutzbarer. Die Vocabulary Services unterstützen die semantische Interoperabilität, indem sie gemeinsame Begriffe, Datenmodelle und Vokabulare verfügbar machen, sodass verschiedene Teilnehmer Daten inhaltlich konsistent beschreiben und interpretieren können. Die Observability Services schließlich dienen der Nachvollziehbarkeit von Vorgängen im Datenraum, etwa für Provenance, Traceability oder Audit-Zwecke, und schaffen damit Transparenz über Datennutzung, Ereignisse und Abläufe.

Im Zusammenhang mit Föderationsdiensten stellt sich auch die Frage, wer diese betreibt und für die Teilnehmer zur Verfügung stellt. Die Antwort auf diese Frage ist davon abhängig, wie der Datenraum ausgestaltet ist. Betrachtet man das Gaia-X-Framework, dann können einige der Föderationsdienste von einem Gaia-X Clearing House zur Verfügung gestellt werden. Für das Automotive-Netzwerk Catena-X gilt hingegen, dass die Föderationsdienste von Core Service Providern zur Verfügung gestellt werden und einige Föderationsdienste nur einmal pro Datenraum vorkommen (CSP-B) bzw. mehrfach angeboten werden dürfen (CSP-A). Core Services A decken vor allem die fachlich nutzbaren Föderationsfunktionen wie etwa Catalogue Services ab. Core Services B bündeln über Verification Services eher die Grundlagen für den Vertrauensaufbau. Für den Zusammenhang mit dem Gaia-X Clearing House heißt das: Der Bezug liegt in Catena-X vor allem auf der B-Seite.

ADVANCING EUROPE'S
MACHINERY INDUSTRY



7. Organisation und Governance in unternehmensübergreifenden Datenräumen

Der Erfolg industrieller Datenräume entscheidet sich an der Fähigkeit, vertrauensvolle, verlässliche und skalierbare Zusammenarbeit zwischen unabhängigen Unternehmen zu ermöglichen. Organisation und Governance bilden daher das Rückgrat jedes funktionierenden Datenraums. Sie definieren, wer teilnehmen darf, nach welchen Regeln Daten geteilt werden, wie Vertrauen hergestellt wird und wie Konflikte gelöst werden können.

Im Gegensatz zu unternehmensinternen Datenplattformen bewegen sich Datenräume in einem Spannungsfeld aus Kooperation und Wettbewerb. Unternehmen bleiben rechtlich, wirtschaftlich und strategisch eigenständig, müssen sich aber auf gemeinsame Spielregeln verständigen. Governance ist in diesem Kontext nicht als Kontrolle zu verstehen, sondern als Enabler für eine vertrauensvolle Zusammenarbeit.

7.1 Föderation statt Zentralisierung

Ein zentrales Organisationsprinzip industrieller Datenräume ist die Föderation. Datenräume sind bewusst nicht als zentrale Plattformen oder Datensilos konzipiert, sondern als verteilte Ökosysteme, in denen viele gleichberechtigte Akteure miteinander interagieren. Dieses Modell vermeidet Abhängigkeiten von einzelnen Betreibern und reduziert das Risiko von Machtkonzentration [8].

Föderation bedeutet, dass jedes teilnehmende Unternehmen seine Datenhoheit behält, während gleichzeitig gemeinsame Regeln und technische Standards eine Zusammenarbeit ermöglichen. Governance sorgt in diesem Modell dafür, dass diese Regeln eingehalten werden, ohne die Autonomie der Teilnehmer einzuschränken. Gerade für den Maschinen- und Anlagenbau, der stark mittelständisch geprägt ist, stellt dieses Prinzip eine wesentliche Voraussetzung für Akzeptanz dar.

7.2 Governance als Vertrauensmechanismus: Regeln, Policies und Kontrollmechanismen

Vertrauen ist die entscheidende Währung in unternehmensübergreifenden Datenökosystemen. Unternehmen teilen nur dann sensible Daten, wenn sie darauf vertrauen können, dass Nutzungsrechte eingehalten, Daten nicht missbräuchlich verwendet und Verstöße nachvollziehbar sanktioniert werden können.

Governance schafft diesen Vertrauensrahmen durch klar definierte Regeln und Prozesse, unter anderem für:

- Teilnahme und Nutzung (wer darf teilnehmen, unter welchen Bedingungen, mit welchen Mindestanforderungen) [57]
- Policy-Rahmen für Datennutzung (Zweckbindung, Nutzungsdauer, Weitergabe, Löschung, Zugriffsbeschränkungen)
- Vertrauens- und Compliance-Anforderungen (Auditierbarkeit, Nachweisführung, Zertifizierungen, Security-Baselines) [58]
- Interoperabilitätsvorgaben (Schnittstellen, Datenformate, Semantikmodelle, Konformitätskriterien)

Wichtig ist dabei, dass Governance nicht ausschließlich rechtlich oder organisatorisch umgesetzt wird. In industriellen Datenräumen werden Governance-Regeln zunehmend technisch unterstützt – etwa durch Policies, Usage-Control-Mechanismen und Audit-Funktionen. Governance wird damit „by design“ Bestandteil des Datenraums und nicht nachträglich aufgesetzt. Governance darf nicht versuchen, jedes Detail zu normieren. Über-Governance erstickt Adaption. Unter-Governance zerstört Vertrauen. Ein sinnvoller Ansatz ist ein Mindest-Regelset, das zentrale Risiken adressiert (Sicherheit, Nutzungsrechte, Audit), und darüber hinaus modulare Regelwerke, die je nach Domäne oder Use Case ergänzt werden können [8].

7.3 Rollen und Verantwortlichkeiten im Datenraum-Ökosystem

In Datenräumen müssen Rollen so definiert sein, dass Verantwortlichkeiten klar sind, ohne die Organisation unnötig aufzublähen. Typischerweise lassen sich folgende Rollen unterscheiden: [8]

- Teilnehmer (Provider/Consumer): Unternehmen, die Daten anbieten, beziehen oder beides tun.
- Ökosystem-Governance/Rule Owner: Instanz(en), die Regelwerke definiert, weiterentwickelt und Konfliktmechanismen betreibt.
- Trust Anchor/Identity Provider: Stellen, die Identitäten ausgeben, verifizieren oder Vertrauensniveaus bestätigen.
- Zertifizierer/Conformity Assessment: Akteure, die Konformität zu Regeln und Sicherheitsanforderungen prüfen (technisch/organisatorisch).
- Federation Services Provider: Betreiber von Diensten wie Registry, Katalog, Clearing/Audit-Services oder Policy-Services.
- Schieds-/Eskalationsinstanz: Mechanismus zur Konfliktlösung (Policy-Verstöße, Vertragsauslegung, Audit-Findings).

Für Entscheider relevant ist vor allem: Governance ist nicht „nice to have“. Ohne klar definierte Rollen entstehen schnell Grauzonen – und diese können in unternehmensübergreifenden Datenbeziehungen erheblich zur Verlangsamung von Prozessen beitragen.

7.4 Onboarding, Betrieb und Eskalation: Governance im Tagesgeschäft

Skalierung entsteht nicht durch Strategiepapiere, sondern durch reibungsloses Onboarding, verlässlichen Betrieb und klare Eskalationswege. Datenraum-Governance muss deshalb operative Prozesse definieren, die für Teilnehmer planbar sind:

Onboarding (Eintritt):

Teilnehmer müssen wissen, welche Mindestanforderungen gelten (technisch, organisatorisch, rechtlich), wie Konformität nachgewiesen wird und welche Schritte zur Teilnahme nötig sind. Gute Onboarding-Prozesse sind standardisiert, digitalisiert und wiederholbar – sonst wird Skalierung teuer.

Betrieb (Run):

Ein produktiver Datenraum benötigt klare Betriebsregeln: Service-Level, Verfügbarkeiten, Incident-Prozesse, Update-Mechanismen, Versionsmanagement für Schnittstellen und Semantikmodelle. Ohne geregelten Betrieb bleibt ein Datenraum im „Projektmodus“.

Eskalation (Konfliktfälle):

Unternehmensübergreifender Datenaustausch erzeugt Konflikte: Policy-Verstöße, Fehlkonfigurationen, Streit über Nutzungsrechte oder Audit-Feststellungen. Ein Datenraum muss hierfür klare Eskalationspfade haben. Ziel ist nicht Bestrafung, sondern Handlungsfähigkeit: schnelle Klärung, klare Entscheidung, Wiederherstellung von Vertrauen [59]. Davon unberührt bleiben bereits vorhanden Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) und sonstige (Liefer-) Verträge, welche jedoch als smarte Verträge (Smart Contracts) in manchen Datenraum-Instanzierungen (Pontus-X) Verwendung finden [60].

7.5 Interoperabilität als Governance-Aufgabe: Standardisierung ist nicht optional

Kapitel 2 hat Interoperabilität als Voraussetzung für Skalierung definiert. Governance ist der Mechanismus, der Interoperabilität über Zeit stabil hält. Technische Standards allein reichen nicht. Entscheidend ist, dass Semantikmodelle gepflegt, versioniert und weiterentwickelt werden, Konformitätstests definiert werden (was heißt „kompatibel“ konkret?), Migrationspfade geregelt werden (wie gehen Teilnehmer mit Versionswechseln um?) und Domänenanforderungen abgestimmt werden (z.B. Traceability vs. Energie/PCF vs. Service).

Ohne diese Governance-Arbeit entstehen konkurrierende Standards und Fragmentierung. Dann existieren zwar „Datenräume“, aber nicht mehr ein interoperables Ökosystem.

7.6 Anreizsysteme und Wertlogik: Warum Unternehmen mitmachen (oder nicht)

Teilnahme an Datenräumen ist eine strategische Entscheidung. Governance muss daher auch eine ökonomische Logik abbilden: Was sind die Anreize für Unternehmen, Daten zu teilen oder Datenprodukte anzubieten? Was sind die Kosten und Risiken? Und wie wird Fairness gesichert?

Typische Anreizmechanismen sind:

- Klare Nutzenpfade (welcher Use Case liefert welchen Vorteil?)
- Reziprozität (wer Daten nutzt, liefert ggf. Daten zurück oder zahlt)
- Transparente Kostenmodelle (Mitgliedschaft, Servicegebühren, Betrieb)
- Schutz vor Ausbeutung (kein Datenabfluss ohne Kontrolle, klare Nutzungsrechte)
- Vertrauenslevel (Teilnehmer mit höherer Konformität erhalten leichteren Zugang)

Governance muss hier realistisch bleiben: Wenn das Teilen von Daten einseitig Risiken erzeugt, aber kaum Nutzen, werden Unternehmen nicht teilnehmen – unabhängig von politischem oder technologischem Wunschdenken.

7.7 Manufacturing-X als Koordinationsrahmen: Governance über mehrere Projekte hinweg

Im Kontext von Manufacturing-X ist Governance nicht nur eine Frage innerhalb eines einzelnen Datenraums, sondern auch eine Frage der Interoperabilität zwischen Datenrauminitiativen. Wenn mehrere öffentlich geförderte Projekte Datenräume erproben, müssen gemeinsame Architekturen, Dienste und Schnittstellen so abgestimmt werden, dass ein konsistentes Gesamtbild entsteht. Das ist eine Governance-Aufgabe auf Ökosystemebene: Koordination, Konvergenz, Wiederverwendung.

Manufacturing-X kann hier eine zentrale Rolle spielen, indem es gemeinsame Prinzipien und Mindestanforderungen definiert, Referenzarchitekturen und Konformitätskriterien harmonisiert, die Anschlussfähigkeit zwischen Branchen und Projekten sicherstellt und damit verhindert, dass Förderprojekte zwar branchenspezifische Ergebnisse liefern, aber keine skalierbare Gesamtstruktur entsteht [59].

7.8 Fazit: Governance entscheidet über Skalierung

Industrielle Datenräume sind technisch realisierbar. Ob sie jedoch Wirkung entfalten, entscheidet sich an Organisation und Governance. Ein Datenraum skaliert nur, wenn Vertrauen systematisch organisiert wird:

- Durch klare Rollen,
- verbindliche Regeln,
- überprüfbare Konformität,
- robuste Betriebsprozesse und
- funktionierende Konfliktmechanismen.

Governance ist eine Voraussetzung für ökonomische Wertschöpfung im Ökosystem.

Mit diesem Fundament wird im nächsten Schritt relevant, welche rechtlichen und Compliance-relevanten Rahmenbedingungen diese Governance absichern und begrenzen – und wie Unternehmen regulatorische Anforderungen praxistauglich in den Datenraumkontext übersetzen können.

8. Rechtliche Grundlagen

Souveräner Datenaustausch ist keine rein technische Fragestellung, sondern eine Frage von Vertrauen, Governance und strategischer Wettbewerbsfähigkeit. Ohne eine belastbare rechtliche und Compliance-orientierte Ausgestaltung als Grundlage lassen sich Datenräume weder skalieren noch nachhaltig wirtschaftlich betreiben. Die Einhaltung der regulatorischen Vorgaben ist Voraussetzung für die effektive Teilnahme an diesen Ökosystemen.

8.1 Regulatorischer Rahmen der EU

Der europäische Gesetzgeber hat in den vergangenen Jahren ein umfassendes Regelwerk für die Digital- und Datenwirtschaft etabliert. Die drei zentralen Säulen betreffen unterschiedliche Aspekte des Datenaustauschs: die EU-Datenverordnung (Data Act) regelt den Zugang und die Nutzung von bestimmten Daten sowie Anforderungen an Teilnehmer von Datenräumen, der Data Governance Act (DGA) soll Vertrauen für den Datenaustausch schaffen, und die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)[61] stellt den Schutz von personenbezogenen Daten sicher. Darüber hinaus sind gegebenenfalls branchenspezifische Regelungen zu beachten, insbesondere die KI-Verordnung für KI-gestützte Anwendungen, die NIS-2-Richtlinie für Cybersicherheit sowie der Cyber Resilience Act (CRA) für digitale Produkte. Ergänzt werden diese Regelungen durch das europäische Kartellrecht.

Diese Regulierungen greifen teilweise äußerst komplex ineinander und sollen den Ausgangspunkt für die Förderung von Datennutzung und Innovation bilden bei gleichzeitiger Wahrung von Datensouveränität, fairen Wettbewerbsbedingungen und Grundrechten.

8.1.1 Data Governance Act (DGA): Vertrauensinfrastruktur für Datenräume

Der Data Governance Act soll Vertrauensstrukturen für den Datenaustausch schaffen, indem er Anforderungen an Datenvermittlungsdienste und Bedingungen für deren Erbringung festlegt, Rahmenbedingungen für Datenaltruismus schafft und einen europäischen Dateninnovationsrat einrichtet, der Leitlinien zu gemeinsamen europäischen Datenräumen erarbeiten soll [62]. Der DGA enthält keine Verpflichtungen für die Teilnahme an Datenräumen, sondern soll die Einrichtung und das Vertrauen in die Nutzung von Datenräumen unterstützen.

8.1.2 EU-Datenverordnung (Data Act): Rechte und Pflichten im industriellen Datenaustausch

Der Data Act regelt den Zugang und die Nutzung von Daten, die bei der Nutzung vernetzter Produkte und verbundener Dienste entstehen [63]. Seit dem 12. September 2025 haben die Nutzer dieser Produkte und Dienste gegen die sogenannten Dateninhaber einen Anspruch auf Bereitstellung der Produktdaten bzw. der verbundenen Dienstdaten, die die Produkte und Dienste während der Nutzung generieren. Möchten Dateninhaber und Hersteller diese Daten für eigene Zwecke, wie z. B. Produktentwicklung, nutzen, darf dies nur auf vertraglicher Grundlage mit dem Nutzer geschehen. Auch die Nutzung von Datenräumen durch Dateninhaber und Hersteller muss also vertraglich mit dem Nutzer vereinbart werden. Dabei müssen Verträge über den Datenzugang und die -nutzung fair sein und dürfen nicht diskriminieren; missbräuchliche Klauseln, z. B. der vollständige Ausschluss des Datenzugangs, sind unwirksam. Darüber hinaus enthält der Data Act wesentliche Anforderungen an die Interoperabilität von Daten, von Mechanismen und Diensten für die Datenweitergabe sowie von gemeinsamen europäischen Datenräumen. Wer an einem Datenraum teilnehmen möchte, muss bestimmte Anforderungen erfüllen (vgl. Artikel 33 Absatz 1 Data Act).

- Datensatzinhalte, Nutzungsbeschränkungen, Lizenzen, Datenerhebungsmethoden, Datenqualität und Unsicherheiten müssen hinreichend beschrieben werden, um dem Empfänger das Auffinden der Daten, den Datenzugang und die Datennutzung zu ermöglichen.
- Die Datenstrukturen, Datenformate, Vokabulare, Klassifizierungssysteme, Taxonomien und Codelisten, sofern verfügbar, müssen in einer öffentlich verfügbaren und einheitlichen Weise beschrieben werden.
- Die technischen Mittel für den Datenzugang sowie ihre Nutzungsbedingungen und die Dienstqualität müssen so beschrieben werden, dass sie den automatischen Datenzugang und die automatische Datenübermittlung zwischen den Parteien ermöglichen. Soweit technisch machbar, muss dies auch kontinuierlich, im Massen-Download oder in Echtzeit in einem maschinenlesbaren Format ermöglicht werden.

- Außerdem müssen gegebenenfalls die Mittel bereitgestellt werden, mit denen die Interoperabilität von Tools für die Automatisierung der Ausführung von Verträgen über die Datenweitergabe, wie intelligenten Verträgen, ermöglicht wird.

Der Data Act schafft also nicht nur die Verpflichtung zum Datenteilen, sondern legt darüber hinaus bestimmte Anforderungen fest, wenn Daten in Datenräumen geteilt werden sollen.

Weitere Informationen zum Data Act finden Sie auf der VDMA-Themenseite:

<https://www.vdma.eu/de/eu-datenverordnung>.

8.1.3 Datenschutz im Kontext industrieller Datenräume

Im industriellen Kontext dürften Datenräume primär auf nicht-personenbezogene Industriedaten ausgerichtet sein. Gleichwohl muss der Datenschutz mitgedacht werden. Maschinendaten weisen häufig aufgrund der weitreichenden Definition im Gesetz Personenbezüge auf, etwa über Logdaten, Bedienerkennungen oder Standortinformationen.

Jede Datennutzung und -weitergabe von personenbezogenen Daten im Datenraum muss daher nach der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)[61], und ggf. einschlägiger nationaler Regulierung wie dem Bundesdatenschutzgesetz (BDSG), auf einer tragfähigen Rechtsgrundlage beruhen. Außerdem muss die betroffene Person über die Verarbeitung ihrer personenbezogenen Daten, sprich die Weitergabe über einen Datenraum, informiert werden. Weitere Pflichten nach der DSGVO betreffen eine klare Rollenverteilung (Verantwortlicher, Auftragsverarbeiter, gemeinsam Verantwortliche), die Zweckbindung, Datenminimierung, Transparenz sowie die Durchsetzbarkeit von Betroffenenrechten auch in verteilten Datenökosystemen.

8.1.4 Kartell- und wettbewerbsrechtliche Leitplanken

Der Datenaustausch in Datenräumen kann Wettbewerber zusammenbringen oder wettbewerbslich sensible Daten umfassen. Damit entsteht ein Spannungsfeld zwischen erwünschter Kooperation und den zu wählenden kartellrechtlichen Grenzen. Die Teilnehmer von Datenräumen unterliegen unmittelbar den Vorgaben des europäischen und ggf. nationalen Kartellrechts. Kritisch sind insbesondere der Austausch wettbewerbslich sensibler Informationen, diskriminierende Zugangsregeln oder der Missbrauch von Marktmacht.

Es muss klar zwischen wettbewerbslich sensiblen und unkritischen Daten unterschieden werden, denn wettbewerbslich sensible Daten dürfen allenfalls in aggregierter Form geteilt werden, so dass keine Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen möglich sind. Hierbei sollte auch die Kombinationsmöglichkeit von unterschiedlichen Datensätzen und der Einsatz von KI bei der Datenanalyse mit bedacht werden.

Der Austausch individualisierter, aktueller und wettbewerbslich sensibler Daten (z. B. Einzelpreise, Produktionskapazitäten, Kapazitätsauslastungen, Auftragseingänge, Informationen zu Kunden- oder Lieferantenbeziehungen) zwischen Wettbewerbern in einem Datenraum kann als kartellrechtswidrige Verhaltensabstimmung gewertet werden – auch ohne ausdrückliche Absprache. Bußgelder können bis zu 10 Prozent des weltweiten Jahresumsatzes betragen.

Soweit wettbewerbslich sensible Daten in einem Datenraum vorkommen, müssen daher technische und organisatorische Maßnahmen ergriffen werden, damit Wettbewerber nicht auf diese zugreifen können.

8.1.5 Operative Compliance-Anforderungen für Unternehmen

Die Teilnahme an europäischen Datenräumen erfordert die Umsetzung konkreter organisatorischer und technischer Maßnahmen. Es besteht die Notwendigkeit einer integrierten Datenraum-Governance, die Datenschutz, Datenrecht und Kartellrecht, sowie gegebenenfalls weitere relevante Regulierung gemeinsam adressiert. Isolierte Compliance-Ansätze könnten zu kurz greifen.

Grundsätzlich sollten rechtliche Absicherung (Verträge, Lizenzmodelle), organisatorische Verankerung (Data Governance Framework, ggf. Datenschutzfolgenabschätzung, Eskalationsprozesse) und technische Durchsetzung (Policy-Management, Integritätsschutz, Auditierbarkeit, Zugriffskontrollen) in die Überlegungen für die Compliance-Umsetzung Eingang finden.

Die Einhaltung und Umsetzung der rechtlichen Vorgaben ist eine zentrale Voraussetzung für funktionierende und skalierbare Datenräume. Unternehmen, die Datenschutz, Kartellrecht und neue EU-Datenregulierungen frühzeitig integrieren, schaffen Vertrauen, reduzieren Risiken und steigern damit ihre Chancen, Geschäftspotenziale gewinnbringend auszuschöpfen.

9. Skalierung industrieller Datenräume und ihre Rolle für Industrial AI

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, warum industrielle Datenräume notwendig sind, wie sie funktionieren und welchen wirtschaftlichen Mehrwert sie heute bereits stiften können. Gleichzeitig markieren Datenräume den Ausgangspunkt für die nächste Entwicklungsstufe industrieller Digitalisierung. Kapitel 9 richtet daher den Blick nach vorn und zeigt, wie skalierte Datenräume zur zentralen Grundlage für performante industrielle KI-Anwendungen (Industrial AI) werden.

Industrielle Datenräume entfalten ihren vollen Nutzen erst dann, wenn sie über einzelne Pilotanwendungen hinaus skalieren und dauerhaft in industriellen Wertschöpfungsstrukturen verankert werden. Viele frühe Initiativen zeigen, dass der technische Aufbau eines Datenraums zwar anspruchsvoll, aber beherrschbar ist. Die eigentliche Herausforderung liegt jedoch in der Skalierung: in der Überführung von isolierten Use Cases in produktive, unternehmensübergreifende Ökosysteme mit wachsender Teilnehmerzahl, stabilen Governance-Strukturen und messbarem wirtschaftlichem Nutzen.

Gleichzeitig rückt mit dem Fortschritt industrieller KI-Anwendungen eine zweite Perspektive in den Vordergrund. Leistungsfähige Industrial-AI-Modelle benötigen nicht nur große Datenmengen, sondern vor allem qualitativ hochwertige, kontextualisierte und rechtssicher nutzbare Daten. Genau hier treffen sich die Skalierungslogik industrieller Datenräume und die Anforderungen moderner industrieller KI. Datenräume bilden damit die Grundlage für performante, vertrauenswürdige und skalierbare Industrial-AI-Anwendungen [64].

9.1 Erfolgsfaktoren für die Skalierung industrieller Datenräume

Die Skalierung eines Datenraums basiert auf der Entwicklung eines Ökosystems. Zentrale Erfolgskriterien lassen sich dabei klar benennen.

Ein erster Faktor ist Interoperabilität als Designprinzip. Datenräume können nur dann wachsen, wenn neue Teilnehmer, Dienste und Anwendungsfälle ohne hohe Integrationskosten angebunden werden können. Einheitliche Schnittstellen, gemeinsame semantische Modelle und wiederverwendbare Architekturbausteine sind Voraussetzung für die Skalierung. Proprietäre Sonderlösungen führen unweigerlich zu Fragmentierung und bremsen das Wachstum des Ökosystems [8].

Eng damit verbunden ist stabile Governance bei wachsender Teilnehmerzahl. Mit zunehmender Größe steigen Anforderungen an Rollenklärung, Regelwerke, Policy-Durchsetzung und Konfliktlösung. Skalierbare Datenräume benötigen klare, transparente und für alle Teilnehmer nachvollziehbare Governance-Mechanismen, die Vertrauen schaffen, ohne die Innovationsgeschwindigkeit zu blockieren. Governance ist ein System, das mit dem Ökosystem mitwächst [65].

Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Betriebs. Datenräume müssen langfristig betrieben, weiterentwickelt und abgesichert werden. Skalierung gelingt nur, wenn Betriebskosten, Nutzen und Wertschöpfung in einem nachvollziehbaren Verhältnis stehen. Datenräume, die ausschließlich projektgetrieben oder förderfinanziert bleiben, erreichen keine nachhaltige Wirkung.

Schließlich ist Brownfield-Integration ein entscheidender Hebel. Die industrielle Realität ist geprägt von bestehenden Maschinen, IT-Systemen, proprietären Schnittstellen und historisch gewachsenen Prozessen. Datenräume müssen diese Realität integrieren, nicht ersetzen. Skalierbare Datenräume zeichnen sich dadurch aus, dass sie schrittweise anschlussfähig sind und Mehrwert liefern, ohne bestehende Produktionsumgebungen grundlegend umbauen zu müssen.

9.2 Von Pilotprojekten zu produktiven Ökosystemen

Viele Datenrauminiciativen starten mit klar abgegrenzten Anwendungsfällen: einem spezifischen Datenaustausch, einer Lieferkettenanwendung oder einem regulatorischen Nachweis. Diese Piloten sind wichtig und bilden die Basis für den Übergang in den produktiven Betrieb vom einzelnen Use Case hin zu wiederverwendbaren Daten und Servicebausteinen.

Skalierung bedeutet in diesem Kontext, dass einmal etablierte Datenmodelle, Governance-Regeln und technische Komponenten für neue Anwendungsfälle wiederverwendet werden können. Datenräume entwickeln so Netzwerkeffekte, die entscheidend dafür sind, um sie als dauerhaften Bestandteil industrieller Wertschöpfung zu etablieren [65].

9.3 Datenräume als Fundament für Industrial AI

Parallel zur Skalierung von Datenräumen gewinnt Industrial AI zunehmend an Bedeutung. In der industriellen Praxis zeigt sich jedoch, dass viele KI-Initiativen an denselben Problemen scheitern: unzureichende Datenqualität, fehlender Kontext, rechtliche Unsicherheiten und fragmentierte Datenlandschaften. Performante industrielle KI ist weniger ein Modell- als ein Datenproblem [64].

Industrielle Datenräume adressieren genau diese Herausforderung. Sie stellen sicher, dass Daten nicht nur verfügbar, sondern auch kontextualisiert, standardisiert, qualitätsgesichert und rechtssicher nutzbar sind. Semantische Modelle, Metadaten, Nutzungsregeln und Auditierbarkeit schaffen die Grundlage, auf der KI-Modelle trainiert, validiert und betrieben werden können.

Darüber hinaus ermöglichen Datenräume den souveränen Umgang mit sensiblen Daten. Unternehmen können entscheiden, ob Daten für KI-Training, die Anwendung des trainierten Modells oder gemeinsame Modellverbesserung genutzt werden dürfen und unter welchen Bedingungen. Damit eröffnen Datenräume neue Ansätze wie kollaboratives Lernen oder verteiltes Training, ohne dass Rohdaten zentralisiert werden oder Kontrolle abgegeben werden muss.

9.4 Skalierung von Industrial AI über Unternehmensgrenzen hinweg

Ein wesentliches Potenzial industrieller KI liegt in der Skalierung über einzelne Werke oder Unternehmen hinaus. Viele industrielle Fragestellungen – etwa in der Qualitätssicherung, der vorausschauenden Wartung oder der Energieoptimierung – profitieren von Daten aus unterschiedlichen Produktionsumgebungen. Ohne Datenräume ist eine solche Skalierung praktisch nicht realisierbar.

Datenräume ermöglichen es, KI-Modelle auf einer breiteren Datenbasis zu trainieren, ohne proprietäre Plattformabhängigkeiten zu erzeugen. Gleichzeitig unterstützen sie die Nachweisbarkeit von KI-Entscheidungen und damit die Anforderungen aus Regulierung und Compliance. Für den industriellen Einsatz von KI ist dies entscheidend: Vertrauen, Transparenz und Auditierbarkeit sind ebenso wichtig wie Modellgenauigkeit [66].

Mit interoperablen, souveränen Dateninfrastrukturen entfaltet industrielle KI ihr volles Potenzial [67].

9.5 Strategische Bedeutung für Unternehmen

Die Verbindung von skalierbaren Datenräumen und Industrial AI hat unmittelbare strategische Konsequenzen. Unternehmen müssen entscheiden, ob sie Datenräume lediglich als Infrastruktur für einzelne Anwendungsfälle nutzen oder als langfristige Grundlage für datengetriebene Innovation und KI-gestützte Wertschöpfung verstehen.

Wer frühzeitig in skalierbare Datenraumarchitekturen investiert, schafft nicht nur Effizienzgewinne, sondern auch die Basis für kontinuierliche Verbesserung, lernende Systeme und neue datenbasierte Produkte. Gleichzeitig reduziert sich die Abhängigkeit von proprietären Plattformen und geschlossenen KI-Ökosystemen.

Damit wird deutlich: Die Skalierung industrieller Datenräume und der Einsatz von Industrial AI sind zwei Seiten derselben Medaille. Datenräume liefern die strukturelle, organisatorische und rechtliche Grundlage, auf der industrielle KI nachhaltig, souverän und wirtschaftlich betrieben werden kann.

10. Abkürzungsverzeichnis

A

AAS – Asset Administration Shell (Verwaltungsschale)

ACM – Association for Computing Machinery

AGB – Allgemeine Geschäftsbedingungen

AI – Artificial Intelligence / Künstliche Intelligenz

AISBL – Association Internationale Sans But Lucratif
(belgische Rechtsform)

API – Application Programming Interface

B

BDSG – Bundesdatenschutzgesetz

BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

C

CELEX – EU-Datenbank-ID für Rechtsakte

CIRP – International Academy for Production Engineering

CRA – Cyber Resilience Act

CSP-A – Catena-X Core Service Provider Typ A

CSP-B – Catena-X Core Service Provider Typ B

CX – Catena-X

cxOS – Catena-X Operating System

D

DA – Data Act (EU-Datenverordnung)

DANUBE – Gaia-X Trust Framework Version 3

DCAT – Data Catalog Vocabulary

DCP – Decentralized Claims Protocol

DGA – Data Governance Act

DID – Decentralized Identifier

DLT – Distributed Ledger Technology

DMA – Digital Markets Act

DPP – Digital Product Passport (Digitaler Produktpass)

DSGVO – Datenschutz-Grundverordnung

DSP – Dataspace Protocol

DSSC – Data Space Support Centre

E

EDC – Eclipse Dataspace Components

EDR – Endpoint Data Reference

EU AI – EU Artificial Intelligence (AI Act)

EUDI – European Digital Identity (Wallet)

EU – Europäische Union

eIDAS – electronic IDentification, Authentication and Trust
ServiceseID – elektronische Identität

F

FuE – Forschung und Entwicklung

G

GAIA-X – Europäische Daten- und Cloud-Initiative

GITO – GITO Verlag

H

HTML – HyperText Markup Language

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

HTTP POST – HTTP-Methode „POST“

I

IDS – International Data Spaces

IDS-RAM – IDS Reference Architecture Model

IDSAs – International Data Spaces Association

IDTA – Industrial Digital Twin Association

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IESE – Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering

IOSB – Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung

IP – Intellectual Property

ISBN – Internationale Standardbuchnummer

ISO – International Organization for Standardization

ISSN – Internationale Standardnummer für fortlaufende Sammelwerke

IT – Informationstechnologie

K

KKI – Künstliche Intelligenz

KIT – Keep-it-Together

KMU – Kleine und mittlere Unternehmen

L

LOIRE – Gaia-X Trust Framework Version 2

M

MX – Manufacturing-X

N

NIS-2 – Richtlinie über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union

O

OAuth 2.0 – Open Authorization 2.0

ODRL – Open Digital Rights Language

OEE – Overall Equipment Effectiveness

OEM – Original Equipment Manufacturer

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture

OPC UA CS – Open Platform Communications Unified Architecture

OSS – Open Source Software

P

PCF – Product Carbon Footprint

S

SCSN – Smart Connected Supplier Network

SSI – Self-Sovereign Identity

SSO – Single Sign-On

V

VC – Verifiable Credential

W

W3C – World Wide Web Consortium

11. Glossar

After-Sales-Service

After-Sales-Service umfasst alle Leistungen nach dem Verkauf einer Maschine, etwa Wartung, Ersatzteile oder Support. Datenräume ermöglichen dessen vorausschauende, integrierte und skalierbare Ausgestaltung.

Brownfield-Integration

Brownfield-Integration beschreibt die Einbindung bestehender Maschinen, IT-Systeme und Prozesse in einen Datenraum. Sie ist entscheidend für die praktische Umsetzbarkeit im industriellen Umfeld.

Compliance

Compliance bezeichnet die Einhaltung rechtlicher, regulatorischer und interner Vorgaben. In Datenräumen wird Compliance zunehmend technisch unterstützt und auditierbar umgesetzt.

Datenbasierte Produkte

Datenbasierte Produkte sind digitale Leistungen, die auf Daten aus Maschinen, Prozessen oder Nutzungskontexten aufbauen. Sie sind die operative Einheit der Wertschöpfung in der Datenökonomie.

Datenkatalog

Ein Datenkatalog macht Datenangebote über Metadaten auffindbar und beschreibbar. Er ist Voraussetzung für Discovery- und Aushandlungsprozesse im Datenraum.

Datenqualität

Datenqualität beschreibt Genauigkeit, Vollständigkeit, Aktualität und Kontextualisierung von Daten. Sie ist eine zentrale Voraussetzung für verlässliche Analysen und KI-Modelle.

Datensouveränität

Datensouveränität beschreibt die Fähigkeit eines Unternehmens, jederzeit zu bestimmen, wer welche Daten zu welchem Zweck und unter welchen Bedingungen nutzen darf. Sie ist das zentrale Vertrauensprinzip industrieller Datenräume.

Digitale Identität

Eine digitale Identität ermöglicht die eindeutige Identifikation und Authentifizierung von Unternehmen oder Personen im Datenraum. Sie ist die Grundlage für Vertrauen, Zugriffssteuerung und Verantwortlichkeit.

Digitale Services

Digitale Services sind kontinuierliche, datenbasierte Leistungen wie Predictive Maintenance oder Remote Support. Sie erweitern physische Produkte um wiederkehrende Mehrwerte.

EU Data Act

Der Data Act regelt Rechte und Pflichten beim Zugang zur Nutzung von Daten vernetzter Produkte. Er definiert zentrale Anforderungen an Interoperabilität und Fairness in Datenräumen.

Föderation

Föderation bedeutet, dass Datenräume dezentral organisiert sind und keine zentrale Kontrollinstanz besitzen. Daten verbleiben bei ihren Eigentümern, während gemeinsame Regeln die Zusammenarbeit ermöglichen.

Föderationsdienste

Föderationsdienste sind gemeinsam genutzte Dienste wie Kataloge, Registries oder Verifikationsdienste, die Vertrauen, Auffindbarkeit und Interoperabilität im Datenraum ermöglichen. Sie unterstützen das Zusammenspiel der Teilnehmer ohne zentrale Datenhaltung.

Geschäftsmodell

Ein Geschäftsmodell beschreibt, wie ein Unternehmen Wert schafft, liefert und monetarisiert. In Datenräumen basieren Geschäftsmodelle zunehmend auf Daten, Services und Nutzung statt auf einmaligem Produktverkauf.

Governance

Governance umfasst Regeln, Rollen, Prozesse und Kontrollmechanismen für den Betrieb eines Datenraums. Sie organisiert Vertrauen, Compliance und Skalierbarkeit im Ökosystem.

Industrial AI (Industrielle Künstliche Intelligenz)

Industrial AI bezeichnet KI-Anwendungen für industrielle Prozesse, Produkte und Services. Ihre Leistungsfähigkeit hängt entscheidend von Datenqualität, Kontext und Data Governance ab.

Industrieller Datenraum

Ein industrieller Datenraum ist ein föderierter Rahmen aus Regeln, technischen Bausteinen und Governance-Mechanismen, der den souveränen, sicheren und interoperablen Austausch von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht. Er ist weder eine zentrale Plattform noch ein Datenspeicher.

Interoperabilität

Interoperabilität bezeichnet die Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, Organisationen und Anwendungen, effektiv zusammenzuarbeiten. In Datenräumen umfasst sie syntaktische, semantische, organisatorische und rechtliche Ebenen.

Konnektor

Ein Konnektor ist das technische Gateway eines Unternehmens in den Datenraum. Er ermöglicht die Aus- und Handlung von Nutzungsrechten, die Durchsetzung von Policies und den kontrollierten Datentransfer.

Manufacturing-X

Manufacturing-X ist der industriepolitische und förderrechtliche Rahmen zur Umsetzung industrieller Datenräume in der produzierenden Industrie. Ziel ist die Skalierung interoperabler, souveräner Datenökosysteme.

Netzwerkeffekte

Netzwerkeffekte entstehen, wenn der Nutzen eines Systems mit der Anzahl der Teilnehmer wächst. In Datenräumen steigt der Mehrwert mit jedem zusätzlichen Datenanbieter oder -nutzer.

Ökosystem

Ein Datenökosystem ist ein Netzwerk gleichberechtigter Akteure, die über einen Datenraum kooperieren. Wertschöpfung entsteht durch das Zusammenspiel mehrerer Teilnehmer entlang der Wertschöpfungskette.

Semantik

Semantik stellt sicher, dass Daten über Unternehmensgrenzen hinweg gleich verstanden werden. Sie wird durch gemeinsame Datenmodelle, Ontologien und Standards erreicht.

Self-Sovereign Identity (SSI)

SSI ist ein dezentrales Identitätskonzept, bei dem der Inhaber die Kontrolle über seine Identität und Nachweise selbst behält. Identitätsinformationen werden ohne zentrale Vermittler überprüfbar gemacht.

Skalierung

Skalierung bezeichnet die Fähigkeit eines Datenraums, von einzelnen Use Cases zu produktiven Ökosystemen zu wachsen. Voraussetzung sind Interoperabilität, Governance und wirtschaftlicher Betrieb.

Usage Control

Usage Control beschreibt die technische Durchsetzung von Nutzungsbedingungen für Daten. Sie stellt sicher, dass vereinbarte Regeln auch nach der Datenübertragung eingehalten werden.

12. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] O. Schwarz, P. Anke und F. Möller, „A Federated Infrastructure for European Data Spaces“, Communications of the ACM, Jg. 65, Nr. 4, S. 44–51, Apr. 2022. doi: [10.1145/3512348](https://doi.org/10.1145/3512348).
- [2] M. Draghi, „The Future of European Competitiveness: A Competitiveness Strategy for Europe“, European Commission, Brüssel, Belgien, Bericht, Sep. 2024. Adresse: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en
- [3] European Parliament and Council of the European Union. „Regulation (EU) 2023/2854 on harmonised rules on fair access to and use of data (Data Act)“, besucht am 26. März 2026. Adresse: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act>
- [4] European Parliament and Council of the European Union, besucht am 26. März 2026. Adresse: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-governance-act>
- [5] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, „The Role of Data Spaces in the Digital Economy“, Gaia-X, Brüssel, Belgien, Whitepaper, März 2025. Adresse: https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2025/03/White-Paper_The-Role-of-Data-Spaces-in-the-Digital-Economy-1.pdf
- [6] Catena-X Automotive Network e. V. „Why: Understanding the Catena-X Data Space“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://catenax-ev.github.io/docs/operating-model/why-understanding-the-catenax-x-data-space>
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. „Förderlinie Manufacturing-X“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/CdbQD7Ob1ph0219js0B>
- [8] International Data Spaces Association e.V. „IDS Reference Architecture Model“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/offers/reference-architecture/>
- [9] A. Hosseinzadeh u. a., „Usage Control in the International Data Spaces“, Positionspapier, 2021. Adresse: https://internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/IDSA-Position-Paper-Usage-Control-in-the-IDS-V3.pdf
- [10] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., „Manufacturing-X Data Space Study“, ZVEI, Frankfurt am Main, Deutschland, Studie, 2023. Adresse: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2023_059_Manufacturing-X/Manufacturing-X_Data_Space_Study.pdf
- [11] Eclipse Foundation AISBL. „Eclipse Dataspace Components (EDC): Project Documentation“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://projects.eclipse.org/projects/technology.edc>
- [12] K. Alexopoulos u. a., „An industrial data-spaces framework for resilient manufacturing value chains“, Procedia CIRP, Jg. 116, S. 299–304, 2023. doi: [10.1016/j.procir.2023.02.051](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.051).
- [13] A. Braud, G. Fromentoux, B. Radier und O. Le Grand, „The Road to European Digital Sovereignty with GAIA-X and IDSA“, IEEE Network, Jg. 35, Nr. 2, S. 4–5, 2021, März/April. Adresse: <https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2022/05/The-Road-to-European-Digital-Sovereignty-with-GAIA-X-and-IDSA.pdf>
- [14] A. Scala und M. Delmastro, „The explosive value of the networks“, Scientific Reports, Jg. 13, 2023, artno 1037. doi: [10.1038/s41598-022-26961-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-26961-x).
- [15] P. Kraemer, C. Niebel und A. Reiberg, „Gaia-X und Geschäftsmodelle: Typen und Beispiele“, Whitepaper 1/2023, 2023. Adresse: <https://gaia-x-hub.de/publikation/wp-gaia-x-geschaeftsmodelle/>
- [16] Hessen Trade & Invest GmbH, Auf zu digitalen Welten – Leitfaden zur Entwicklung digitaler Geschäftsmodelle für produzierende Unternehmen. Wiesbaden, Deutschland: Technologieland Hessen, 2022.
- [17] Forschungsbeirat Industrie 4.0 / acatech, „Erfolgreiche digitale und datengetriebene Geschäftsmodelle für Industrie 4.0 mit Fokus auf den Maschinen- und Anlagenbau“, Forschungsbeirat Industrie 4.0 / acatech, Studie, 2025. doi: [10.48669/fb40_2025](https://doi.org/10.48669/fb40_2025).

- [18] Plattform Industrie 4.0. „Manufacturing-X Initiative“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html>
- [19] deltaDAO AG. „Pontus-X – European Data Space Infrastructure“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.pontus-x.eu/>
- [20] M. Hüske, „Skalierbare Geschäftsmodelle in ManufacturingX“, Factory Innovation, 2026, GITO Verlag.
- [21] T. Körner u. a., „Neue Technologien erfordern neue digitale Geschäftsmodelle“, Factory Innovation, 2026, GITO Verlag.
- [22] VDMA, „Digitale Geschäftsmodelle“, VDMA, Studie. Adresse: https://www.vdma.eu/documents/34570/76845115/VDMA_IMPULS_Kurzstudie_Digitale_Geschaeftsmodelle.pdf
- [23] Projekt SCALE-MX, „Anwendungsfelder in ManufacturingX“, Projekt SCALE-MX, Whitepaper, 2025. Adresse: <https://www.scale-mx.org/wp-content/uploads/sites/3/2025/10/Whitepaper-Anwendungsfelder-in-Manufacturing-X.pdf>
- [24] G. Sames, „Schleppende Digitalisierung im Mittelstand (KMU)“, Factory Innovation, 2024. doi: [10.30844/FID.24.6.GS](https://doi.org/10.30844/FID.24.6.GS).
- [25] T. Schneider u. a., „Umdenken as a Service“, The Axel Springer Consulting Group, Bericht, 2023.
- [26] Fraunhofer-Gesellschaft. „International Data Spaces“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/international-data-spaces.html>
- [27] International Data Spaces Association e.V. „Reference Architecture“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/offers/reference-architecture/>
- [28] International Data Spaces Association e.V. „IDS-RAM 4 Documentation“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://docs.internationaldataspaces.org/ids-knowledgebase/ids-ram-4>
- [29] International Data Spaces Association e.V. „International Data Spaces“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/>
- [30] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. „Gaia-X Framework“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://docs.gai-x.eu/#/framework>
- [31] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. „Trust Framework Architecture“, besucht am 9. März 2026. Adresse: https://docs.gai-x.eu/technical-committee/architecture-document/25.11/trust_framework_architecture/
- [32] Eclipse Foundation AISBL. „Eclipse Dataspace Components“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://projects.eclipse.org/projects/technology.edc>
- [33] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. „Gaia-X Context“, besucht am 9. März 2026. Adresse: https://docs.gai-x.eu/technical-committee/architecture-document/25.11/gai-x_context/
- [34] Eclipse Tractus-X. „About Us“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://eclipse-tractusx.github.io/AboutUs/>
- [35] Catena-X Automotive Network e. V. „Service Map“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://catenax-ev.github.io/docs/operating-model/what-service-map>
- [36] Eclipse Foundation AISBL. „Eclipse Dataspace Decentralized Claims Protocol (DCP)“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://projects.eclipse.org/proposals/eclipse-dataspace-decentralized-claims-protocol>
- [37] J. Schütz u. a., „Data Space Basics“, Whitepaper, Version 1.0, 17. Juli 2025. Adresse: https://catena-x.net/wp-content/uploads/2025/07/Transfer-X_Whitepaper-Data-Space-Basics_deutsch.pdf
- [38] European Commission. „Common European Data Spaces“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-spaces>
- [39] Fraunhofer Institute for Software and Systems Engineering. „Data Spaces Support Centre“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://dssc.eu/>
- [40] Fraunhofer IOSB. „Factory-X – souveräner Datenraum für den Maschinen- und Anlagenbau“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/factory-x.html>
- [41] Factory-X. „Factory-X stellt das MX-Port-Konzept vor“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://factory-x.org/de/factory-x-stellt-mx-port-konzept-vor/>

- [42] Bitkom e. V. „Vertrauen stärken: Digitale Identitäten, SSI & DLT“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Vertrauen-staerken-Leitfaden-digitale-Identitaeten-SSI-DLT>
- [43] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. „Single Sign-On“, besucht am 9. März 2026. Adresse: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Informationen-und-Empfehlungen/Cyber-Sicherheitsempfehlungen/Accountschutz/Single-Sign-On/single-sign-on_node.html
- [44] European Commission. „eIDAS-Verordnung.“ Gestaltung der digitalen Zukunft Europas, besucht am 13. März 2026. Adresse: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/eidas-regulation>
- [45] World Wide Web Consortium. „Verifiable Credentials Data Model“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/>
- [46] Catena-X Automotive Network e. V. „Data Space Operations“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://catenax-ev.github.io/docs/operating-model/how-data-space-operations>
- [47] Cofinity-X GmbH. „Register Your Company“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://userguide.cofinity-x.com/en/articles/203671-register-your-company>
- [48] Fraunhofer Institute for Software and Systems Engineering. „DSSC Blueprint – Participant Agent“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://blueprint.dssc.eu/>
- [49] Fraunhofer Institute for Software and Systems Engineering. „DSSC Blueprint – Control Plane“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://blueprint.dssc.eu/>
- [50] International Data Spaces Association e.V. „Data Space Protocol“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://docs.internationaldataspaces.org/ids-knowledgebase/dataspace-protocol>
- [51] International Data Spaces Association e.V., „Data Space Connector Report“, International Data Spaces Association, Bericht, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/data-space-connector-report/>
- [52] Eclipse Contributors. „Control Plane (for Adopters)“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://eclipse-edc.github.io/documentation/for-adopters/control-plane>
- [53] World Wide Web Consortium. „Data Catalog Vocabulary (DCAT)“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.w3.org/TR/vocab-dcat-3/>
- [54] World Wide Web Consortium. „ODRL Information Model“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.w3.org/TR/odrl-model/>
- [55] Eclipse Contributors. „Management API“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://eclipse-edc.github.io/Connector/openapi/management-api/>
- [56] 2026-03-09. „Services for Implementing Technical Building Blocks“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://dssc.eu/space/BVE2/1071254998>
- [57] International Data Spaces Association e.V., besucht am 9. März 2026. Adresse: https://docs.internationaldataspaces.org/ids-knowledgebase/ids-ram-4/perspectives-of-the-reference-architecture-model/4_3_governance_perspective
- [58] Fraunhofer Institute for Software and Systems Engineering. „Trust Framework – Identity and Attestation Management“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://dssc.eu/space/bv15e/766068747/Trust+Framework>
- [59] International Data Spaces Association e.V. „Manufacturing-X: Data Spaces for Productivity in Action.“ Adresse: <https://internationaldataspaces.org/manufacturing-x-data-spaces-for-productivity-in-action/>
- [60] R. García und R. Gil, „Agriculture Data Space for Sovereign Data Sharing and Semantic Integration“, Universität de Lleida, Lleida, Spanien, Technischer Bericht, Juni 2024. Adresse: <https://semantic.internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/2024/08/Agriculture-Data-Space-for-Sovereign-Data-Sharing-and-Semantic-Integration.pdf>
- [61] European Union. „Regulation (EU) 2016/679 (General Data Protection Regulation)“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj/deu>
- [62] European Union. „Regulation (EU) 2022/868 (Data Governance Act)“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022R0868>
- [63] European Union. „Regulation (EU) 2023/2854 (Data Act)“, besucht am 23. März 2026. Adresse: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202302854

[64] McKinsey & Company. „Clearing data-quality roadblocks: Unlocking AI in manufacturing“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/clearing-data-quality-roadblocks-unlocking-ai-in-manufacturing>

[65] Catena-X Automotive Network e. V. „Governance Framework for Data Space Operations“, besucht am 26. März 2026. Adresse: <https://catenax-ev.github.io/docs/regulatory-framework/governance-framework>

[66] Techfinders Research. „Federated Learning in Manufacturing“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://techfinders.io/2024/09/20/federated-learning-in-manufacturing/>

[67] International Data Spaces Association e.V., „Semantic Interoperability in Data Spaces“, International Data Spaces Association, Positionspapier, 2023. Adresse: https://internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/IDSA-Position-Paper-Semantic-Interoperability-in-Data-Spaces.pdf

[68] A. Reiberg, C. Niebel und A.-R. Schmitz, „Governance von Datenräumen“, Whitepaper 1/2024, 2024.

[69] J. Matthes und E. Schmitz. „Konkurrenzdruck aus China für deutsche Firmen“, besucht am 23. März 2026. Adresse: <https://www.iwkoeln.de/studien/juergen-matthes-konkurrenzdruck-aus-china-fuer-deutsche-firmen.html>

[70] VDMA, Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung im Mittelstand. Frankfurt am Main, Deutschland: VDMA Verlag.

[71] Industrial Digital Twin Applications GmbH. „Asset Data eXchange Hub“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://adx-hub.com/>

[72] European Commission. „European Digital Identity“, besucht am 9. März 2026. Adresse: https://commission.europa.eu/topics/digital-economy-and-society/european-digital-identity_de

[73] International Data Spaces Association e.V., „Data Usage Control in the IDS“, IDSA, Berlin, Deutschland, Positionspapier, Version 3.0, 2021. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/data-sovereignty-updated-position-paper-on-data-usage-control-in-the-ids/>

[74] International Data Spaces Association e.V. „Understanding the IDS Reference Architecture Model“, besucht am 9. März 2026. Adresse: <https://internationaldataspaces.org/understanding-the-idsa-reference-architecture-model/>

Impressum

VDMA e.V.
Forum Manufacturing-X
Lyoner Str. 18
60528 Frankfurt am Main
Deutschland

© 2026
VDMA e. V.

Stand: März 2026

Herstellung:
Druck- und Verlagshaus
Zarbock GmbH & Co. KG,
Frankfurt am Main

FORUM MANUFACTURING-X

VDMA e. V.
Lyoner Str. 18
60528 Frankfurt am Main



[vdma.eu](https://www.vdma.eu)