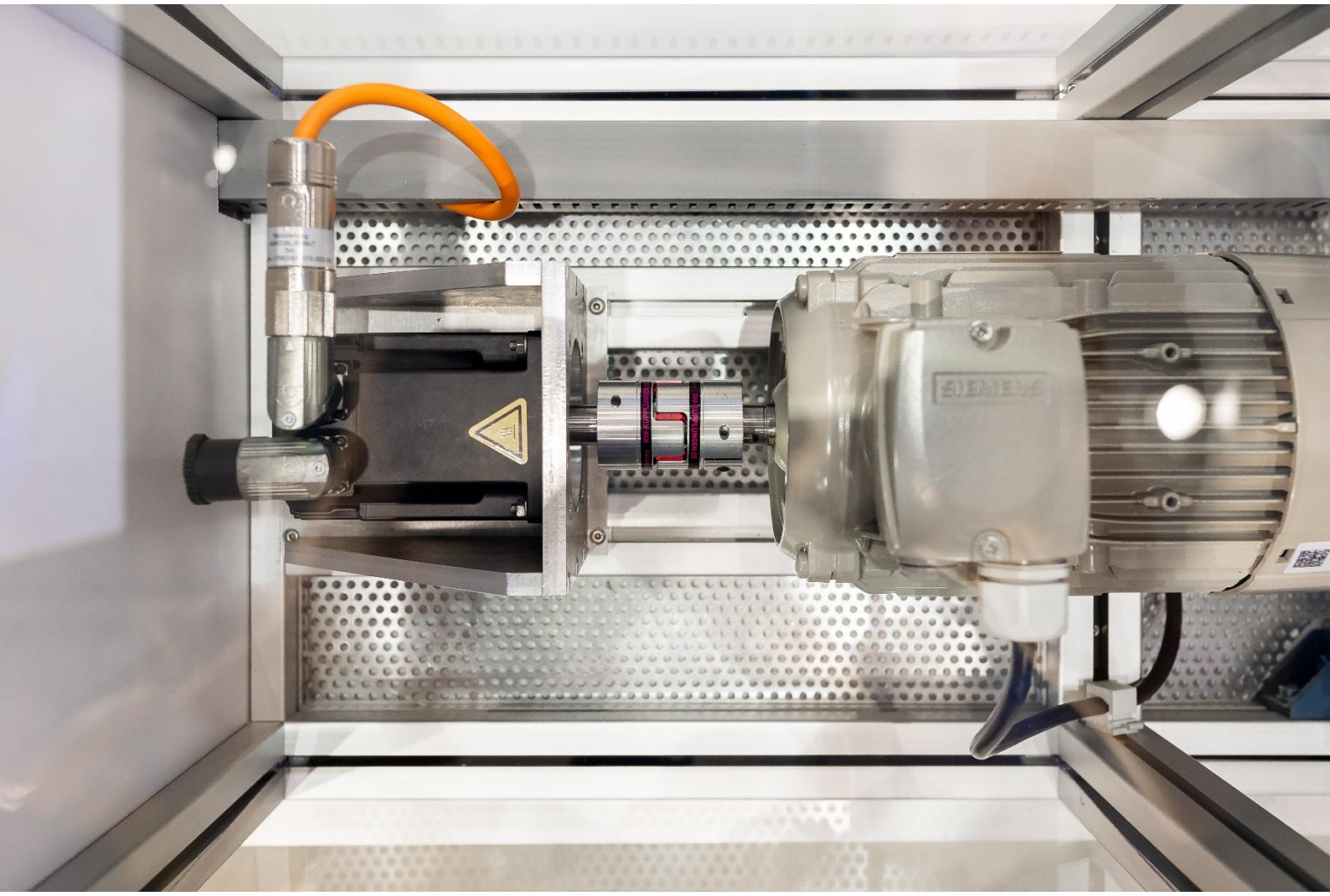
antrieb 4.0



Whitepaper

Vom Maschinenraum in den Datenraum

Eine Machbarkeits- und Umsetzungsstudie zu Architektur und Implementierungen interoperabler Antriebssysteme in einem föderierten Datenökosystem

Förderhinweis

Das Forschungsprojekt „Reallabor Antrieb 4.0“ wird im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets der Bundesregierung (KoPa), Ziffer 35c – Modul a2 „Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie“, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) und der Europäischen Union aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Forschungsprojekt Antrieb 4.0

Antrieb 4.0 wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Die Konsortialleitung liegt bei der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. Weitere Konsortialpartner sind: Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementechnologie IISB, die Fachgebiete Leistungselektronik und Antriebsregelung beziehungsweise Kommunikationsnetze der Technischen Universität Darmstadt, das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt, sowie 18 assoziierte Partnerunternehmen. Mehr Informationen unter: www.antrieb40.org

zvei electrifying ideas

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Fraunhofer IIS

Fraunhofer IISB

Executive Summary

Vom Demonstrator zur industriellen Umsetzung

Die industrielle Digitalisierung befindet sich an einem Wendepunkt. Während Industrie 4.0 in den vergangenen Jahren vor allem die Vernetzung von Maschinen und Anlagen vorangetrieben hat, stehen heute **interoperable Datenräume, Datensouveränität und Industrial AI** im Mittelpunkt. Unternehmen stehen vor der Herausforderung, Informationen organisationsübergreifend nutzbar zu machen, ohne die Kontrolle über ihre Daten aufzugeben. Initiativen wie Manufacturing-X verfolgen hierfür ein gemeinsames Ziel: Daten als Grundlage neuer Formen industrieller Wertschöpfung verfügbar zu machen. Das Reallabor **Antrieb 4.0** zeigt, wie sich diese Vision bereits heute mit etablierten Technologien praktisch umsetzen lässt.

Was wurde im Projekt umgesetzt?

Im Forschungsprojekt wurde eine **durchgängige Referenzarchitektur für datenraumfähige Antriebssysteme** entwickelt, implementiert und unter realitätsnahen Bedingungen validiert. Die Architektur verbindet physische Antriebssysteme, OPC-UA-Kommunikation, Edge- und Cloud-Infrastrukturen, Verwaltungsschalen (Asset Administration Shells), föderierte Datenraumtechnologien und interoperable digitale Dienste zu einem gemeinsamen Informationsraum. Entlang einer vertikalen Informationskette werden Betriebsdaten schrittweise zu semantisch beschriebenen Informationen und schließlich zu digitalen Mehrwertdiensten verarbeitet. Gleichzeitig verbleiben sämtliche produktiven Daten bei ihren jeweiligen Eigentümern und werden ausschließlich kontrolliert über den Datenraum bereitgestellt.

Welche Ergebnisse wurden erreicht?

Im Demonstrator konnten zwei zentrale Referenz-Use-Cases erfolgreich umgesetzt werden: das **digitalisierte Asset Management** für Monitoring und Analyse im Betrieb sowie die **energieeffiziente Auslegung und Verifikation** von Antriebssystemen. Insgesamt wurden fünf interoperable Services entwickelt und validiert – vom Energie- und Überlastmonitoring bis hin zu Design-/Sizing- und Verifikationsdiensten. Die Ergebnisse zeigen, dass **herstellerübergreifende Interoperabilität, semantische Integration und Datensouveränität** bereits heute mit offenen Industriestandards praktisch realisierbar sind.

Zentrale Erkenntnisse

Die Machbarkeitsstudie bestätigt, dass die technologischen Bausteine datenraumfähiger Industrieanwendungen verfügbar sind. Der eigentliche Mehrwert entsteht jedoch nicht durch den Datenaustausch selbst, sondern durch **wiederverwendbare digitale Services**, die Daten unterschiedlicher Akteure miteinander verbinden und daraus neue Funktionen, Optimierungsmöglichkeiten und Geschäftsmodelle ableiten. Erfolgreiche Datenräume beruhen dabei auf fünf zentralen Architekturprinzipien:

- standardisierte Kommunikation und Informationsmodelle,
- semantische Interoperabilität durch Verwaltungsschalen,
- föderierte Datenhaltung bei den jeweiligen Eigentümern,
- serviceorientierte Architekturen mit wiederverwendbaren Cloud-Diensten,
- kontrollierter organisationsübergreifender Datenaustausch.

Die Projektergebnisse zeigen außerdem, dass technische Interoperabilität häufig einfacher umzusetzen ist als die organisationsübergreifende Harmonisierung gemeinsamer Informationsmodelle und Governance-Strukturen.

Orientierung für Unternehmen

Das Whitepaper versteht sich nicht nur als Dokumentation der Projektergebnisse, sondern als **praxisorientierter Leitfaden** für Unternehmen auf dem Weg zur Datenraumfähigkeit. Neben Referenzarchitektur und Demonstrator werden konkrete Handlungsempfehlungen, Architekturentscheidungen, Checklisten und Entwicklungsmodelle vorgestellt. Unternehmen können ihren Einstieg schrittweise gestalten – von der Digitalisierung einzelner Anlagen über standardisierte Kommunikation und Verwaltungsschalen bis hin zu interoperablen Services, datenraumfähigen Produkten und zukünftigen Industrial-AI-Anwendungen. Die dargestellten Entwicklungsstufen und der technische Datenraum-Readiness-Check unterstützen dabei, den eigenen Entwicklungsstand einzuordnen und geeignete nächste Schritte abzuleiten.

Vom Datenraum zur Industrial AI

Die im Projekt entwickelten Architekturen schaffen die Grundlage für die nächste Entwicklungsstufe industrieller Digitalisierung. **Verwaltungsschalen liefern den semantischen Kontext, Datenräume ermöglichen den souveränen Zugriff auf organisationsübergreifende Informationen und digitale Services erzeugen den wirtschaftlichen Mehrwert.** Auf dieser Basis entstehen die Voraussetzungen für zukünftige Industrial-AI-Anwendungen, die auf interoperablen, kontextualisierten und vertrauenswürdig nutzbaren Daten aufbauen. Antrieb 4.0 liefert damit nicht nur einen erfolgreichen Machbarkeitsnachweis, sondern einen übertragbaren Referenzansatz für Manufacturing-X-konforme Datenräume und zukünftige industrielle Datenökosysteme.

Das Wichtigste auf einen Blick

Zehn Erkenntnisse für den Weg zur Datenraumfähigkeit

Datenräume sind heute technisch realisierbar.

Das Reallabor Antrieb 4.0 zeigt, dass interoperable Datenräume bereits heute mit offenen Standards und verfügbaren Technologien praktisch umgesetzt werden können.

Interoperabilität entsteht durch Semantik.

Standardisierte Kommunikation allein genügt nicht. Erst gemeinsame Informationsmodelle, Verwaltungsschalen und semantische Beschreibungen ermöglichen die organisationsübergreifende Interpretation von Informationen.

Datenhoheit bleibt erhalten.

Produktive Daten müssen den Eigentümer nicht verlassen. Föderierte Datenräume ermöglichen Datensouveränität und gleichzeitig die organisationsübergreifende Nutzung digitaler Dienste.

Der Mehrwert entsteht durch Services.

Der wirtschaftliche Nutzen liegt nicht im Datenaustausch selbst, sondern in wiederverwendbaren digitalen Services, die Daten unterschiedlicher Akteure intelligent miteinander verbinden.

Verwaltungsschalen schaffen den Kontext.

Asset Administration Shells verbinden Engineering-, Produkt- und Betriebsinformationen zu einem gemeinsamen semantischen Informationsmodell und bilden das Rückgrat interoperabler Datenräume.

Datenraumfähigkeit entsteht schrittweise.

Unternehmen müssen nicht sofort vollständige Datenräume aufbauen. Bereits standardisierte Schnittstellen, Verwaltungsschalen oder erste Monitoring-Services schaffen konkreten Mehrwert und bilden die Grundlage für weitere Entwicklungsschritte.

Engineering und Betrieb wachsen zusammen.

Die Verknüpfung von Auslegungsdaten mit realen Betriebsdaten ermöglicht kontinuierliche Optimierung, bessere Engineering-Entscheidungen und energieeffizientere Antriebssysteme.

Datenräume sind Organisationsprojekte.

Neben Technologie entscheiden gemeinsame Informationsmodelle, Governance, Verantwortlichkeiten und organisationsübergreifende Zusammenarbeit über den langfristigen Erfolg.

Datenraumfähigkeit schafft neue Geschäftsmodelle.

Standardisierte Services können herstellerübergreifend wiederverwendet, skaliert und organisationsübergreifend bereitgestellt werden. Dadurch entstehen neue Potenziale für digitale Wertschöpfung.

Datenräume schaffen die Grundlage für Industrial AI.

Interoperable Daten, semantischer Kontext und vertrauenswürdige Datenräume bilden die Voraussetzung für zukünftige KI-gestützte Assistenz-, Analyse- und Optimierungsdienste.

> **Key Takeaway**
>
> Datenraumfähigkeit entsteht nicht durch die Einführung einer einzelnen Technologie. Entscheidend ist das Zusammenspiel standardisierter Kommunikation, semantischer Informationsmodelle, Verwaltungsschalen, föderierter Datenräume und interoperabler Services. Erst dieses Zusammenspiel schafft die Grundlage für neue Formen der industriellen Wertschöpfung – heute durch datengetriebene Services und künftig durch Industrial AI.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mehrwerte entlang des Lebenszyklus 16
Abbildung 2: Prozess des Use Case Roadmapping 17
Abbildung 3: Use Case Digitalisiertes Asset Management 19
Abbildung 4: Use Case energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen 19
Abbildung 5: Sichere Vernetzung der Demonstratorumgebung über VPN 24
Abbildung 6: Kommunikationsqualität mit und ohne Time-Sensitive Networking (TSN) 26
Abbildung 7: Versuchsaufbau des Antriebsdemonstrators 27
Abbildung 8: Referenzarchitektur des Demonstrators Antrieb 4.0 29
Abbildung 9: Referenzarchitektur des Datenraums Antrieb 4.0 32
Abbildung 10: Checkliste zur Datenraumfähigkeit 54
Abbildung 11: Technischer Leitfaden zur Datenraumfähigkeit 55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der beiden Referenz-Use-Cases und ihrer zentralen Merkmale 18
Tabelle 2: Warum Edge und Cloud gemeinsam benötigt werden 25
Tabelle 3: Architekturprinzipien des Datenraums Antrieb 4.0 28
Tabelle 4: Datensouveränität im Vergleich 34
Tabelle 5: Zentrale Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie 46
Tabelle 6: Architektur- und Umsetzungsentscheidungen und ihr praktischer Nutzen 49
Tabelle 7: Vier Handlungsfelder auf dem Weg in den Datenraum 51
Tabelle 8: Von der AAS zur Industrial AI – Beitrag der Projektergebnisse 57

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung – Von der Vision zur Umsetzung 10

1.1 Industrie im Wandel – Daten als strategischer Produktionsfaktor 10
1.2 Von Industrie 4.0 zu Manufacturing-X 11
1.3 Die Entwicklungslinie Antrieb 4.0 12
1.4 Warum elektrische Antriebssysteme? 12
1.5 Vom Datenraum zur datengetriebenen Wertschöpfung 13
1.6 Zielsetzung des Projekts und Aufbau des Whitepapers 13

2. Vision datengetriebene Antriebstechnik: Referenz-Use-Cases 15

2.1 Ausgangspunkt: Von technologischen Möglichkeiten zu konkretem Nutzen 15
2.2 Identifikation potenzieller Anwendungsfälle 15
2.3 Bewertung und Priorisierung 17
2.4 Auswahl der Referenz-Use-Cases 18
2.5 Die Referenz-Use-Cases im Überblick 18
2.5.1 Digitalisiertes Asset Management 19
2.5.2 Ganzheitliche energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen 19
2.6 Von den Referenz-Use-Cases zu Demonstratoren und Services 20

3. Interoperabilität durch offene Standards 21

4. Technologische Grundlagen: Der Reallaboransatz 22

4.1 Herausforderungen interoperabler Industrie-4.0-Antriebssysteme 22
4.2 AAS und digitale Zwillinge als semantisches Fundament 22
4.3 Standardisierte Kommunikation mit OPC UA 23
4.4 Semantische Integration und Wissensrepräsentation 23
4.5 Edge Computing, Cloud Computing und föderierte Datenräume 24
4.6 Deterministische Kommunikation mit TSN und PTP 26
4.7 Das Reallabor als Integrationsplattform 27

5. Die Architektur: Vom Feldgerät zum Datenraum 28

5.1 Designprinzipien und Technologiestack 28
5.2 Systemarchitektur des Datenraums Antrieb 4.0 29
5.2.1 Feldebene 30
5.2.2 Edge-Ebene 30
5.2.3 Edge Services 30
5.2.4 Edge-Connectoren 30
5.2.5 Globaler Datenraum-Connector 31
5.2.6 Typ- und Instanzverwaltungsschalen als vertikale Integrationsebene 31
5.2.7 Cloud Services 32
5.3 Semantische Integration als Grundlage der Interoperabilität 33
5.4 Datensouveränität und föderierte Analysefähigkeit 33
5.5 Sicherheitsarchitektur des Datenraums 34

5.6 Daten und Services zusammenführen: Die Serviceplattform 35
5.7 Umsetzung im Demonstrator und praktische Validierung 35
5.8 Erweiterungsperspektiven und Anschlussfähigkeit 35

6. Implementierung und Validierung im Reallabor 36

6.1 Skalierbare Demonstratorarchitektur 36
6.2 Homogene Edge-Architektur und Datenhaltung 37
6.3 Sichere Kommunikation und Adressierung 37
6.4 Föderierter Datenzugriff 37
6.5 Nutzerverwaltung und Identitätsmanagement 38
6.6 Verwaltungsschalen als semantisches Rückgrat 38
6.7 Standardisierung als Grundlage der Interoperabilität 38
6.8 Monitoring, Betrieb und Skalierbarkeit 39
6.9 Architektur im Praxistest 39

7. Datengetriebene Services im Einsatz und ihr Mehrwert 41

7.1 Services in der Referenzarchitektur 41
7.2 Digitalisiertes Asset Management 42
7.2.1 Aufbau der Edge-Datenbank 42
7.2.2 Beschreibung des Programmablaufs entlang der Systemarchitektur 42
7.2.3 Grundlegender Aufbau der Cloud-Analytics 43
7.2.4 Monitoring-Services 43
7.3 Energieeffiziente Antriebsauslegung 44
7.3.1 Service für energieeffiziente Auslegung (Design/Sizing) 44
7.3.2 Service zur Auslegungsverifikation (Design Verification) 45
7.3.3 Interoperable Services im Datenraum: Eine kurze Zusammenfassung 45

8. Ergebnisse der Machbarkeitsstudie – was wirklich funktioniert 46

8.1 Interoperabilität entsteht nicht durch Standards allein 47
8.2 Verwaltungsschalen schaffen Mehrwert durch Anwendungen 47
8.3 Datensouveränität und Datennutzung lassen sich vereinbaren 47
8.4 Daten lokal halten, Analytics als Service bereitstellen 47
8.5 Integration ist die eigentliche Herausforderung 47
8.6 Die Verbindung von Engineering und Betrieb schafft Mehrwert 48
8.7 Erfolgreiche Datenräume sind Organisationsprojekte 48
8.8 Services schaffen wirtschaftlichen Nutzen 48

9. Der Weg in die Praxis – Empfehlungen für Unternehmen 51

9.1 Standards als Grundlage zukünftiger Interoperabilität 51
9.2 Informationen semantisch beschreiben und nutzbar machen 51
9.3 Service-Readiness für datengetriebene Wertschöpfung 52
9.4 Datenhoheit erhalten und gleichzeitig Mehrwert schaffen 52
9.5 Datenraumfähigkeit organisatorisch verankern 52
9.6 Get Ready for Datenraum Antrieb 4.0 53

10. Vom Datenraum zur Industrial AI 56
10.1 Datenräume als Fundament der Wertschöpfung 56
10.2 Von der Machbarkeitsstudie zu Manufacturing-X 57
10.3 Industrial AI braucht Datenräume 58
10.4 Ausblick 59

1. Einleitung – Von der Vision zur Umsetzung

Das Projekt „Reallabor Antrieb 4.0“ untersucht die praktische Umsetzung datenraumfähiger Antriebssysteme. Ziel war die Entwicklung und Validierung einer interoperablen Referenzarchitektur, die Verwaltungsschalen, Datenräume und digitale Dienste zu einem durchgängigen Informationsraum verbindet. Die Ergebnisse zeigen, dass datenraumgestützte Wertschöpfung auf Basis etablierter Industriestandards bereits heute technisch realisierbar ist. Daten gelten zunehmend als strategischer Produktionsfaktor der Industrie. Gleichzeitig entstehen mit Manufacturing-X, Factory-X und weiteren Datenrauminitiativen neue Formen organisationsübergreifender Zusammenarbeit, die auf offenen Standards, Datensouveränität und interoperablen digitalen Ökosystemen basieren. Die hierfür notwendigen Technologien – von Verwaltungsschalen über OPC UA bis hin zu föderierten Datenräumen – sind inzwischen weitgehend verfügbar. Die entscheidende Frage lautet daher nicht mehr, ob datengetriebene Wertschöpfung technisch möglich ist, sondern wie sie unter realen industriellen Bedingungen praktisch umgesetzt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass offene Standards und semantisch interoperable Informationsmodelle die Grundlage für organisationsübergreifende Datenökosysteme bilden können. Gleichzeitig verdeutlichen sie, dass Datensouveränität und Datennutzung keine Gegensätze darstellen müssen. Gerade für kleine und mittlere Unternehmen eröffnet dies die Möglichkeit, an datengetriebenen Wertschöpfungsnetzwerken teilzunehmen, ohne die Kontrolle über eigene Datenbestände aufzugeben. Damit liefert Antrieb 4.0 nicht nur den Nachweis der technischen Machbarkeit datenraumfähiger Antriebssysteme. Das Projekt schafft zugleich eine praxisnahe Referenz für die Umsetzung von Manufacturing-X-Prinzipien in einer industriellen Domäne und legt die Grundlage für die nächste Entwicklungsstufe industrieller Digitalisierung – von datengetriebenen Services und digitalen Ökosystemen bis hin zu zukünftigen Industrial-AI-Anwendungen.

1.1 Industrie im Wandel – Daten als strategischer Produktionsfaktor

Die industrielle Wertschöpfung befindet sich in einer Phase tiefgreifender Transformation. Geopolitische Unsicherheiten, steigende Energie- und Rohstoffkosten, globale Lieferkettenrisiken, Fachkräftemangel sowie wachsende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Resilienz verändern die Rahmenbedingungen produzierender Unternehmen grundlegend. Gleichzeitig eröffnen Digitalisierung, Vernetzung und Künstliche Intelligenz neue Möglichkeiten zur Steigerung von Produktivität, Effizienz und Innovationsfähigkeit. Vor diesem Hintergrund entwickeln sich **Daten zu einem strategischen Produktionsfaktor**. Während Wettbewerbsvorteile in der Vergangenheit primär durch Produktqualität, Fertigungskompetenz und Prozesswissen bestimmt wurden, entstehen neue Wertschöpfungspotenziale zunehmend durch die Fähigkeit, Daten über Unternehmensgrenzen hinweg verfügbar zu machen, zu verknüpfen und intelligent zu nutzen. Daten werden damit zu einer **zentralen Ressource für die industrielle Transformation** und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026c).

Gleichzeitig zeigen aktuelle Untersuchungen, dass insbesondere die deutsche Industrie vor erheblichen Herausforderungen steht. Neben zunehmendem internationalem Wettbewerbsdruck verändern datenbasierte Wertschöpfungsmodelle, digitale Plattformen und Künstliche Intelligenz die Logik industrieller Märkte grundlegend. Die Fähigkeit zur Teilnahme an **digitalen Ökosystemen** wird zunehmend zu einem **entscheidenden Wettbewerbsfaktor** für Unternehmen aller Größenklassen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026c). Der wirtschaftliche Nutzen digitaler Technologien entsteht dabei nur selten innerhalb eines einzelnen Unternehmens. Viele relevante Informationen verteilen sich entlang von Lieferketten, Produkten, Maschinen, Komponenten und Serviceprozessen. Obwohl moderne technische Systeme bereits heute umfangreiche Daten erzeugen, verbleiben diese häufig in proprietären

Anwendungen, isolierten Datenbeständen oder organisationsspezifischen IT-Systemen. Die Folge sind Medienbrüche, Mehrfacheingaben, mangelnde Interoperabilität und ungenutzte Potenziale für Innovation und Effizienzsteigerung.

Vor diesem Hintergrund gewinnen **digitale Ökosysteme und Datenräume** zunehmend an Bedeutung. Sie schaffen die Voraussetzungen für die organisationsübergreifende Nutzung von Daten und ermöglichen neue Formen datengetriebener Zusammenarbeit. Daten werden damit nicht nur zum Produktionsfaktor einzelner Unternehmen, sondern zur **Grundlage gemeinsamer Wertschöpfung** in vernetzten industriellen Ökosystemen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2023a; Plattform Industrie 4.0, 2022b).

1.2 Von Industrie 4.0 zu Manufacturing-X

Mit **Industrie 4.0** wurde erstmals die Vision einer durchgängig vernetzten Produktion formuliert. Cyber-physische Systeme, standardisierte Kommunikation, digitale Zwillinge und interoperable Informationsmodelle bilden seither die Grundlage moderner Industriearchitekturen. Ein wesentlicher Meilenstein dieser Entwicklung war die Einführung der **Asset Administration Shell (AAS)** als standardisierte digitale Repräsentation industrieller Assets. Die Verwaltungsschale fungiert als digitaler Zwilling eines Produkts, einer Komponente oder einer Anlage und ermöglicht die strukturierte Beschreibung von Eigenschaften, Funktionen, Zuständen und Schnittstellen über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Sie schafft damit die Voraussetzung für semantische Interoperabilität und die herstellerübergreifende Nutzung von Informationen in vernetzten Industrieumgebungen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2023b; ZVEI / IDTA, 2026).

Mit zunehmender Digitalisierung wurde jedoch deutlich, dass viele Potenziale erst dann erschlossen werden können, wenn Informationen organisationsübergreifend verfügbar gemacht werden. Hersteller, Maschinenbauer, Betreiber und Serviceanbieter verfügen jeweils über eigene Datenbestände und Kompetenzen, die für zahlreiche Anwendungsfälle gemeinsam betrachtet werden müssen. Gleichzeitig dürfen Datensouveränität, Vertraulichkeit und der Schutz von Geschäftsgeheimnissen nicht verloren gehen. Hier setzen **Datenräume** und die Initiative **Manufacturing-X** an. Ziel ist die Schaffung interoperabler und souveräner Datenökosysteme, in denen Unternehmen Daten kontrolliert austauschen, gemeinsam nutzen und daraus neue Wertschöpfungspotenziale erschließen können. Im Unterschied zu klassischen Plattformansätzen verbleiben die Daten dabei grundsätzlich unter Kontrolle ihrer jeweiligen Eigentümer. Datenräume schaffen somit die Voraussetzungen für vertrauenswürdige Zusammenarbeit, organisationsübergreifende Services und datengetriebene Geschäftsmodelle (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022b; BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023).

Manufacturing-X versteht Datenräume nicht als isolierte technische Infrastruktur, sondern als Fundament einer intelligent vernetzten Industrie. Datenräume, digitale Zwillinge, Verwaltungsschalen und standardisierte Informationsmodelle bilden gemeinsam die Grundlage zukünftiger industrieller Wertschöpfungsnetzwerke. Gleichzeitig schaffen sie die Voraussetzungen für **Industrial-AI-Anwendungen** und datengetriebene Services (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026c). Während Manufacturing-X die strategische Zielrichtung beschreibt, bleibt die praktische Umsetzung interoperabler Datenräume eine zentrale Herausforderung. Genau hier setzt das **Reallabor Antrieb 4.0** an und untersucht, wie sich diese Konzepte unter realen industriellen Bedingungen technisch und organisatorisch umsetzen lassen.

Die beschriebenen Entwicklungen bilden den technologischen und industriepolitischen Hintergrund für das Projekt **Antrieb 4.0**, das die praktische Umsetzung dieser Konzepte im Kontext elektrischer Antriebssysteme untersucht. Die aktuelle Diskussion um **Industrial AI** verdeutlicht die strategische Bedeutung dieser Entwicklung zusätzlich. Während Künstliche Intelligenz zunehmend als Schlüsseltechnologie für Produktivität, Resilienz und Innovation betrachtet wird, zeigt sich in der industriellen Praxis,

dass der entscheidende Engpass häufig nicht in den Algorithmen selbst liegt, sondern in der **Verfügbarkeit strukturierter, interoperabler und vertrauenswürdig nutzbarer Daten**. Verwaltungsschalen schaffen hierfür die notwendige semantische Grundlage, Datenräume ermöglichen den kontrollierten Zugang zu organisationsübergreifenden Informationen. Erst das **Zusammenspiel beider Konzepte** schafft die Voraussetzungen für skalierbare Industrial-AI-Anwendungen entlang industrieller Wertschöpfungsnetzwerke (vgl. ZVEI, 2026a; Plattform Industrie 4.0, 2026c).

1.3 Die Entwicklungslinie Antrieb 4.0

Das Projekt **Antrieb 4.0** entstand nicht isoliert, sondern ist Teil einer langjährigen Entwicklung innerhalb des ZVEI-Arbeitskreises „Industrie 4.0 Elektrische Antriebe“. Mit dem Whitepaper „Antrieb 4.0 – Vision wird Realität“ (ZVEI, 2018) wurden erstmals Anforderungen an digitale Antriebssysteme, Verwaltungsschalen, standardisierte Merkmale und interoperable Informationsmodelle beschrieben. Ziel war es, elektrische Antriebssysteme als aktive Teilnehmer zukünftiger Industrie-4.0-Umgebungen zu etablieren. Aufbauend auf diesen Arbeiten formulierte das Whitepaper **„Antrieb 2030“** (ZVEI, 2020) zwölf Zukunftsthesen zur Weiterentwicklung elektrischer Antriebssysteme. Neben Fragen der Digitalisierung und Vernetzung wurden dort bereits Themen wie datengetriebene Services, digitale Zwillinge, Cloud- und Edge-Architekturen sowie datenbasierte Wertschöpfung adressiert. Bereits in den frühen Whitepapern wurde deutlich, dass die Digitalisierung elektrischer Antriebssysteme nur dann ihr volles Potenzial entfalten kann, wenn Informationen standardisiert beschrieben und über Unternehmensgrenzen hinweg nutzbar gemacht werden. Viele der damals formulierten Anforderungen finden sich heute in **Manufacturing-X** und **Factory-X** wieder.

Das **Reallabor Antrieb 4.0** verfolgte deshalb das Ziel, diese Konzepte erstmals unter realen industriellen Bedingungen technisch umzusetzen und zu validieren. Das Whitepaper basiert auf drei Grundlagen: den Vorarbeiten des ZVEI-Arbeitskreises „Industrie 4.0 Elektrische Antriebe“, den aktuellen Entwicklungen im Umfeld von Manufacturing-X und Factory-X sowie den Ergebnissen des Reallabors Antrieb 4.0.

1.4 Warum elektrische Antriebssysteme?

Elektrische Antriebssysteme gehören zu den wichtigsten Komponenten industrieller Produktionsanlagen. Sie kommen branchenübergreifend in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz und sind für einen erheblichen Anteil des industriellen Energieverbrauchs verantwortlich. Gleichzeitig entstehen entlang ihres Lebenszyklus umfangreiche technische und betriebliche Informationen. Von der Produktentwicklung über Engineering, Inbetriebnahme und Betrieb bis hin zu Wartung, Modernisierung und Recycling fallen Daten an, die für unterschiedliche Akteure relevant sind. Die Relevanz dieser Entwicklung wird besonders deutlich, wenn der gesamte Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme betrachtet wird. Informationen entstehen bereits während der Auslegung und Projektierung, werden im Engineering erweitert, während der Inbetriebnahme konkretisiert und im Betrieb kontinuierlich ergänzt. Erst wenn diese Informationen über Unternehmens- und Systemgrenzen hinweg verfügbar und nutzbar werden, können **durchgängige digitale Prozesse** sowie **datengetriebene Services** entstehen. Die im Projekt Antrieb 4.0 entwickelten Demonstratoren adressieren daher den **durchgängigen Informationsfluss** entlang des Lebenszyklus elektrischer Antriebssysteme. Elektrische Antriebssysteme vereinen hohe technische Komplexität, vielfältige Akteursstrukturen und ein erhebliches Potenzial für datengetriebene Anwendungen. Sie eignen sich daher in besonderer Weise als **Referenzdomäne** für die Entwicklung und Untersuchung datenraumgestützter Wertschöpfung.

1.5 Vom Datenraum zur datengetriebenen Wertschöpfung

Ein zentrales Ziel des Projekts bestand nicht allein im Nachweis der technischen Machbarkeit eines Datenraums. Ebenso wichtig war die Untersuchung, welche **konkreten Mehrwerte** durch die organisationsübergreifende Nutzung von Daten entstehen können und unter welchen Bedingungen sich **datengetriebene Wertschöpfung** wirtschaftlich skalieren lässt. Aus diesem Grund wurden im Projekt bewusst Referenz-Use-Cases und zugehörige datenraumgestützte Services entwickelt.

Am Beispiel der energieeffizienten Auslegung zeigt sich der Nutzen standardisierter Informationsmodelle besonders deutlich. Herstellerübergreifend nutzbare Produkt- und Betriebsdaten reduzieren den Engineering-Aufwand, vermeiden Mehrfacheingaben und verbessern die Vergleichbarkeit von Lösungen. Gerade **kleine und mittlere Unternehmen (KMU)** spielen hierbei eine Schlüsselrolle. Sie bilden den überwiegenden Teil industrieller Wertschöpfungsnetzwerke und verfügen über entscheidende Domänenkompetenzen. Gleichzeitig stehen sie der Teilnahme an Datenökosystemen häufig mit berechtigter Zurückhaltung gegenüber. Fragen der Datensouveränität, Cybersecurity, des Schutzes von Geschäftsgeheimnissen sowie begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen beeinflussen die Bereitschaft zur Teilnahme. Die wirtschaftliche Skalierung von Datenökosystemen hängt daher wesentlich davon ab, ob ein **klar erkennbarer Nutzen** gegenüber den wahrgenommenen Risiken besteht (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2024).

Datenräume schaffen die Infrastruktur für die organisationsübergreifende Nutzung von Daten und digitalen Diensten. In Verbindung mit Verwaltungsschalen und standardisierten Informationsmodellen entstehen die Voraussetzungen für **datengetriebene Services** und zukünftige **Industrial AI**. Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt **Antrieb 4.0** das Ziel, die technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen datengetriebener Wertschöpfung in einem Reallabor praktisch zu untersuchen.

1.6 Zielsetzung des Projekts und Aufbau des Whitepapers

Ziel des Projekts Antrieb 4.0 war die Entwicklung und Validierung einer interoperablen Referenzarchitektur für datenraumfähige Antriebssysteme. Hierzu wurden unterschiedliche Antriebssysteme, Verwaltungsschalen, Datenraumtechnologien und digitale Dienste in einer gemeinsamen Demonstratorumgebung integriert und unter realitätsnahen Bedingungen erprobt. Im Mittelpunkt standen insbesondere folgende Fragestellungen:

- Wie können Daten unterschiedlicher Hersteller interoperabel beschrieben und bereitgestellt werden?
- Welche Rolle übernehmen Verwaltungsschalen als semantische Integrationsanker?
- Wie lassen sich Datensouveränität und organisationsübergreifende Zusammenarbeit praktisch umsetzen?
- Welche Mehrwerte entstehen durch datenraumgestützte Services?
- Welche Voraussetzungen müssen Unternehmen erfüllen, um Teil zukünftiger Datenökosysteme zu werden?

Das vorliegende Whitepaper dokumentiert die Ergebnisse dieser Arbeiten. Es beschreibt die Herleitung und Auswahl der Referenz-Use-Cases, die zugrunde liegenden Technologien, die entwickelte Referenzarchitektur, die praktische Umsetzung im Reallabor sowie die entwickelten Dienste und deren

Potenziale für datengetriebene Wertschöpfung. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie, zentrale Erkenntnisse sowie Handlungsempfehlungen für Unternehmen dargestellt.

Mit der zunehmenden Verbreitung von Datenräumen, digitalen Ökosystemen und Industrial AI gewinnen die im Projekt untersuchten Fragestellungen weiter an Bedeutung. Das Reallabor Antrieb 4.0 liefert hierzu konkrete Umsetzungserfahrungen und zeigt, wie offene Standards, Verwaltungsschalen, Datenräume und digitale Dienste die Grundlage zukünftiger datengetriebener Wertschöpfung bilden können.

2. Vision datengetriebene Antriebstechnik: Referenz-Use-Cases

Im Projekt **Antrieb 4.0** stand nicht die Entwicklung eines einzelnen Demonstrators oder einer konkreten technischen Lösung im Vordergrund. Vielmehr bestand die zentrale Herausforderung darin, aus den vielfältigen Potenzialen von Industrie 4.0, Verwaltungsschalen und Datenräumen diejenigen Anwendungsfälle zu identifizieren, die einen konkreten Mehrwert für die industrielle Antriebstechnik schaffen und gleichzeitig die Möglichkeiten eines föderierten Datenraums exemplarisch demonstrieren können.

2.1 Ausgangspunkt: Von technologischen Möglichkeiten zu konkretem Nutzen

Elektrische Antriebssysteme begleiten industrielle Prozesse über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg – von der Auslegung und Inbetriebnahme über den Betrieb bis hin zu Wartung, Modernisierung und Austausch. Entsprechend vielfältig sind die Informationsflüsse und Optimierungspotenziale entlang dieser Lebenszyklusphasen. Gleichzeitig unterscheiden sich die Anforderungen der beteiligten Akteure erheblich. Komponentenhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer, Betreiber sowie Serviceanbieter verfolgen unterschiedliche Ziele und verfügen über unterschiedliche Informationsbedarfe. Vor diesem Hintergrund wurde früh entschieden, die Auswahl der später im Demonstrator erlebbaren Anwendungsfälle **nicht technologiegetrieben, sondern nutzenorientiert** vorzunehmen. Stattdessen sollte untersucht werden, an welchen Stellen innerhalb des Ökosystems Antriebstechnik datenraumgestützte Mehrwertdienste den größten Nutzen entfalten können.

2.2 Identifikation potenzieller Anwendungsfälle

Die Suche nach geeigneten Anwendungsfällen erfolgte bewusst entlang des **gesamten Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme**. Betrachtet wurden die Phasen Engineering und Auslegung, Inbetriebnahme, Betrieb sowie Instandhaltung. Diese Lebenszyklusperspektive bildete den strukturellen Rahmen für die Identifikation potenzieller Datenraumdienste und stellte sicher, dass sowohl technische als auch organisatorische Fragestellungen berücksichtigt werden konnten.



Abbildung 1: Mehrwerte entlang des Lebenszyklus
Datenraumgestützte Services entlang der Lebenszyklusphasen industrieller Antriebssysteme

Die Abbildung verdeutlicht, wie **datenraumgestützte Services** unterschiedliche Phasen des Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme unterstützen – von der Auslegung und Inbetriebnahme bis hin zu Betrieb und Instandhaltung. Die identifizierten Mehrwerte reichen von Zeit- und Aufwandsersparnissen über eine verbesserte Energieeffizienz bis hin zu höherer Verfügbarkeit und neuen Potenzialen für eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft. Damit wird deutlich, dass Datenräume nicht nur den Austausch von Informationen ermöglichen, sondern die Grundlage für konkrete betriebliche und wirtschaftliche Nutzenpotenziale bilden.

Parallel wurden die Perspektiven der unterschiedlichen Akteure entlang der Wertschöpfungskette untersucht. Komponentenhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer, Betreiber und potenzielle Serviceanbieter wurden als zentrale Nutzergruppen identifiziert. Für jede dieser Rollen wurden Herausforderungen, Informationsbedarfe und potenzielle Mehrwerte analysiert. Im Rahmen von Workshops, Experteninterviews und Konsortialdiskussionen wurden die identifizierten Problemstellungen systematisch erfasst und in datenraumgestützte Anwendungen überführt. Im Mittelpunkt stand dabei **nicht die Frage, welche Daten verfügbar sind, sondern welche Probleme gelöst werden können** und welche Informationen hierfür organisationsübergreifend nutzbar gemacht werden müssen. Insgesamt wurden 36 potenzielle Use Cases identifiziert und strukturiert beschrieben. Sie reichten von Engineering- und Monitoring-Anwendungen bis hin zu Wartungs-, Energieeffizienz- und Dokumentationsdiensten. Bereits in dieser Phase zeigte sich, dass der Mehrwert vor allem durch interoperable Services entsteht.

2.3 Bewertung und Priorisierung

Die Vielzahl identifizierter Anwendungsfälle machte eine **strukturierte Priorisierung** erforderlich. Ziel war es, diejenigen Use Cases auszuwählen, die sowohl einen hohen Nutzen für die beteiligten Akteure versprechen als auch geeignet sind, die grundlegenden Mechanismen eines Datenraums exemplarisch nachzuweisen. Die Bewertung erfolgte mehrstufig. In einer ersten Phase wurden die identifizierten Use Cases innerhalb des Projektkonsortiums hinsichtlich ihres Innovationspotenzials, ihrer technischen Umsetzbarkeit, der Verfügbarkeit erforderlicher Informationen sowie ihrer Eignung für eine prototypische Umsetzung betrachtet. Ergänzend wurden vorhandene Kompetenzen und Ressourcen des Konsortiums berücksichtigt. Auf Basis dieser Bewertung wurde die ursprüngliche Long List von 36 Anwendungsfällen auf zehn vielversprechende Kandidaten verdichtet.

In einer zweiten Phase erfolgte die Bewertung aus Sicht späterer Nutzer und Stakeholder. Berücksichtigt wurden wirtschaftliche Mehrwerte, ökologische Potenziale, die Relevanz für unterschiedliche Akteursgruppen sowie die Übertragbarkeit auf weitere industrielle Anwendungen. Parallel wurden mögliche Serviceangebote, Wertschöpfungsmechanismen und Geschäftsmodellperspektiven betrachtet. Eine wesentliche Erkenntnis dieser Phase bestand darin, dass **nicht die technologisch komplexesten Ideen**, sondern ihre Fähigkeit, mehrere Akteursgruppen gleichzeitig zu adressieren, konkrete Mehrwerte zu schaffen und die Potenziale eines Datenraums nachvollziehbar sichtbar zu machen, den Ausschlag für die Priorisierung gab. Die Darstellung zeigt, wie aus einer breiten Sammlung potenzieller Anwendungsfälle diejenigen identifiziert wurden, die den **größten Nutzen und die höchste Umsetzbarkeit** versprachen.

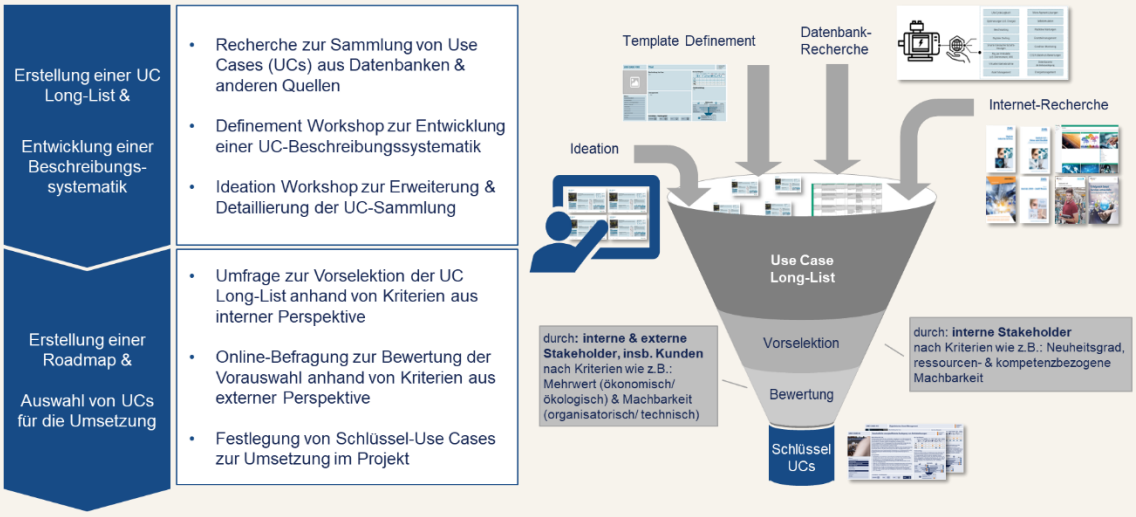


Abbildung 2: Prozess des Use Case Roadmapping
Strukturierter Auswahl- und Priorisierungsprozess zur Ableitung der im Projekt umgesetzten Schlüssel-Use-Cases

Nicht die komplexesten Use Cases wurden ausgewählt

Die priorisierten Anwendungsfälle zeichneten sich nicht durch maximale technische Komplexität aus. Ausschlaggebend waren vielmehr ihr Nutzen für mehrere Akteursgruppen, ihre Übertragbarkeit auf unterschiedliche industrielle Anwendungen sowie ihre Eignung, zentrale Mechanismen eines Datenraums exemplarisch nachzuweisen.

2.4 Auswahl der Referenz-Use-Cases

Aus dem Bewertungsprozess gingen schließlich zwei komplementäre Referenz-Use-Cases hervor, die den Schwerpunkt der weiteren Projektarbeiten bildeten: das **digitalisierte Asset Management** sowie die **ganzheitliche energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen**. Die Auswahl erfolgte bewusst komplementär, um unterschiedliche Anwendungsfelder und Potenziale datenraumgestützter Services abzubilden.

Gemeinsam decken beide Use Cases wesentliche Lebenszyklusphasen industrieller Antriebssysteme ab und ermöglichen die Betrachtung eines durchgängigen Informationsflusses von der Planung bis zum Betrieb. Darüber hinaus adressieren sie unterschiedliche Rollen innerhalb des industriellen Ökosystems. Während das Digitalisierte Asset Management insbesondere die Betriebs- und Instandhaltungsperspektive fokussiert, adressiert die energieeffiziente Auslegung vor allem Engineering-, Planungs- und Beschaffungsprozesse.

2.5 Die Referenz-Use-Cases im Überblick

Die beiden Referenz-Use-Cases strukturierten die Entwicklung von Architektur, Demonstratoren, semantischen Modellen und datengetriebenen Services im Reallabor Antrieb 4.0.

Kategorie	Digitalisiertes Asset Management	Energieeffiziente Auslegung
Schwerpunkt	Betrieb	Engineering
Zielgruppe	Betreiber, Instandhalter	Maschinenbauer, Hersteller
Datenbasis	Betriebsdaten	Produkt- und Betriebsdaten
Ziel	Transparenz und Optimierung	Effiziente Auslegung
Lebenszyklusphase	Betrieb / Instandhaltung	Planung / Engineering

Tabelle 1: Vergleich der beiden Referenz-Use-Cases und ihrer zentralen Merkmale

Die Referenz-Use-Cases als Ausgangspunkt für Architektur, Demonstrator und Services

2.5.1 Digitalisiertes Asset Management

Das **digitalisierte Asset Management** adressiert die Betriebsphase industrieller Antriebssysteme. Ziel ist es, Betriebsdaten systematisch für Transparenz, Analyse und Optimierung zu nutzen. Im Mittelpunkt stehen Energieverbrauch, Effizienz, Anlagenzustände sowie die frühzeitige Erkennung kritischer Betriebsereignisse. Der Use Case wurde ausgewählt, weil er einen unmittelbaren Nutzen für Betreiber und Instandhalter bietet und gleichzeitig zentrale Eigenschaften eines Datenraums demonstriert. Dazu zählen die kontrollierte Bereitstellung von Betriebsdaten, standardisierte Informationsmodelle sowie interoperable Analyse- und Monitoringdienste.



Abbildung 3: Use Case Digitalisiertes Asset Management

2.5.2 Ganzheitliche energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen

Die **ganzheitliche energieeffiziente Auslegung** adressiert die frühen Lebenszyklusphasen von Antriebssystemen. Ziel ist es, Planungs-, Engineering- und Beschaffungsprozesse mithilfe standardisierter Produkt- und Betriebsinformationen zu unterstützen und die Auswahl energieeffizienter Antriebslösungen zu erleichtern. Besonders relevant ist die Möglichkeit, Informationen unterschiedlicher Hersteller über standardisierte Verwaltungsschalen vergleichbar zu machen und daraus herstellerübergreifende Auslegungsentscheidungen abzuleiten. Gleichzeitig können Auslegungsentscheidungen später anhand realer Betriebsdaten überprüft und kontinuierlich verbessert werden. Gemeinsam bilden beide Referenz-Use-Cases einen geschlossenen Betrachtungsrahmen über den Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme und ermöglichen die Untersuchung datenraumgestützter Services im Engineering und im Betrieb.

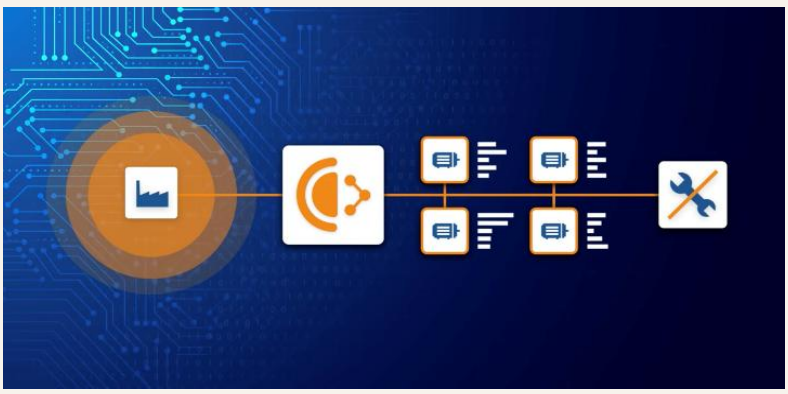


Abbildung 4: Use Case energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen

2.6 Von den Referenz-Use-Cases zu Demonstratoren und Services

Mit der Auswahl der **Referenz-Use-Cases** war zugleich die Grundlage für die weiteren Projektarbeiten geschaffen. Die identifizierten Anwendungsfälle dienten als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Datenraumarchitektur, der semantischen Modelle, der Demonstratoren sowie der späteren Edge- und Cloud-basierten Services. Gleichzeitig bildeten sie den Rahmen für die Untersuchung datengetriebener Wertschöpfungsmodelle.

Die beiden Referenz-Use-Cases erwiesen sich im weiteren Projektverlauf als tragfähige Grundlage für die technische Umsetzung des Reallabors. Sie decken unterschiedliche Phasen des Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme ab und ermöglichten die Untersuchung durchgängiger Informationsflüsse über Unternehmens- und Systemgrenzen hinweg. Auf ihrer Basis wurden Datenraumarchitektur, semantische Modelle, Demonstratoren sowie interoperable Services entwickelt und validiert. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass Datenräume nicht nur den sicheren Austausch von Informationen unterstützen, sondern **konkrete Mehrwerte für unterschiedliche Akteure** der industriellen Antriebstechnik schaffen. Die ausgewählten Use Cases bildeten damit den Ausgangspunkt für den Nachweis, dass **datenraumgestützte Services** mit heutigen Standards und Technologien bereits praktisch realisierbar sind.

3. Interoperabilität durch offene Standards

Das technische Fundament von **Antrieb 4.0** lässt sich als komplementärer Stack aus vier eng verzahnten Standards beschreiben, die jeweils unterschiedliche, aber aufeinander abgestimmte Funktionen erfüllen. ECLASS stellt dabei die semantische Grundlage bereit, indem es standardisierte Merkmale und Klassifikationen für Komponenten definiert und so ein gemeinsames Verständnis von Daten schafft. Darauf aufbauend strukturiert die Asset Administration Shell (AAS) diese Informationen zu einem konsistenten digitalen Zwilling, der als zentraler Integrationsanker für Asset-, Lebenszyklus- und Serviceinformationen dient. Für die operative Ebene übernimmt OPC UA die Rolle des Kommunikationsstandards und ermöglicht den durchgängigen Transfer von Betriebs- und Zustandsdaten zwischen Feld, Edge und Cloud. Schließlich verbindet Linked Data diese strukturierten Informationen in einem föderierten Datenraum, indem es deren semantische Verknüpfung, interoperable Nutzung sowie den kontrollierten Zugriff über Organisationsgrenzen hinweg ermöglicht (vgl. ECLASS e.V., 2025; IEC 62541; ZVEI / ZVEI / IDTA, 2026; Berners-Lee, 2006).

Im Zusammenspiel ergibt sich damit ein **durchgängiger Datenfluss** von der standardisierten Beschreibung über die strukturierte Abbildung und den technischen Datenaustausch bis hin zur datenraumfähigen Integration. Gleichzeitig zeigen die Projektergebnisse, dass diese Standards nur im Zusammenspiel und mit projektspezifischen Anpassungen ihre Wirkung entfalten, da weder AAS, OPC UA noch ECLASS isoliert oder „1:1“ implementiert die gewünschten Interoperabilitätsanforderungen erfüllen. Das eigentliche Fundament liegt daher nicht in einzelnen Standards, sondern in ihrer **orchestrierten Nutzung als Architekturprinzip** für interoperable, herstellerübergreifende Industrie-4.0-Systeme. Auf dieser Grundlage stellt sich im Projekt Antrieb 4.0 die zentrale Frage, ob sich dieses Architekturprinzip nicht nur theoretisch beschreiben, sondern auch praktisch und herstellerübergreifend umsetzen lässt. Genau hier setzt der Demonstrator im Reallabor an: Er dient als Testumgebung, in der die beschriebenen Standards und ihr Zusammenspiel unter realitätsnahen Bedingungen implementiert, integriert und validiert werden.

Im Fokus steht dabei insbesondere die Fähigkeit, **heterogene Komponenten, Datenmodelle und Systeme verschiedener Hersteller interoperabel zu verbinden** – vom Engineering über die Inbetriebnahme bis hin zu Betrieb und Instandhaltung. Damit verschiebt sich die Perspektive vom architektonischen Konzept hin zur praktischen Eignung: Funktioniert Interoperabilität durch Standards auch im konkreten Zusammenspiel realer Systeme und Services?

> **Standards alleine schaffen keine Interoperabilität**
>
> Interoperabilität entsteht erst durch das Zusammenspiel von Semantik, Kommunikation und Datenraumtechnologien. Einzelne Standards allein reichen dafür nicht aus.

4. Technologische Grundlagen: Der Reallaboransatz

Die Digitalisierung industrieller Antriebssysteme hat in den vergangenen Jahren zu einer Vielzahl neuer Technologien, Kommunikationsstandards und digitaler Dienste geführt. Gleichzeitig ist die industrielle Praxis weiterhin durch heterogene Herstellerlandschaften, proprietäre Engineering-Werkzeuge und isolierte Datenbestände geprägt. Informationen über Komponenten, Betriebszustände oder Energieverbräuche sind zwar vorhanden, können jedoch häufig nur innerhalb einzelner Systeme oder Herstellerlösungen genutzt werden.

4.1 Herausforderungen interoperabler Industrie-4.0-Antriebssysteme

Besonders deutlich wird dies entlang des Lebenszyklus eines Antriebssystems. Bereits während der Auslegung entstehen umfangreiche Informationen über Komponenten, Lastprofile und Betriebsanforderungen. Während der Inbetriebnahme werden Parametrierungen und Konfigurationen ergänzt, im laufenden Betrieb kontinuierlich Zustands-, Energie- und Prozessdaten erzeugt. Für Wartung und Service werden diese Informationen erneut benötigt. Häufig liegen sie jedoch in getrennten Systemen ohne durchgängige semantische Verknüpfung vor. Die Folge sind Medienbrüche, hoher Integrationsaufwand und eine eingeschränkte Wiederverwendbarkeit. Daten können zwar übertragen werden, ihre Bedeutung ist jedoch häufig nicht eindeutig interpretierbar. Dadurch wird die Entwicklung herstellerübergreifender digitaler Dienste erheblich erschwert.

Antrieb 4.0 begegnet dieser Herausforderung durch die Kombination standardisierter Informationsmodelle, semantischer Technologien, moderner Kommunikationsstandards und föderierter Datenraumkonzepte. Ziel ist die **Interoperabilität** zwischen Komponenten, Systemen und Organisationen als Grundlage datengetriebener Mehrwertdienste. Interoperabilität bedeutet dabei mehr als die technische Verbindung von Systemen: Erst wenn Informationen organisations- und herstellerübergreifend eindeutig beschrieben, interpretiert und genutzt werden können, entstehen die Voraussetzungen für skalierbare digitale Dienste.

4.2 AAS und digitale Zwillinge als semantisches Fundament

Die **Verwaltungsschale** ermöglicht die strukturierte Bereitstellung von Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Assets hinweg. Technische Eigenschaften, Betriebsdaten sowie Wartungs- und Konfigurationsinformationen können in standardisierten Submodellen beschrieben und maschinenlesbar bereitgestellt werden (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a). Im Projekt kamen sowohl Typ- als auch Instanz-Verwaltungsschalen zum Einsatz. Während Typ-Verwaltungsschalen (Typ-AAS) die allgemeinen Eigenschaften eines Produkttyps beschreiben, repräsentieren Instanz-Verwaltungsschalen (Instanz-AAS) konkrete Komponenten oder Anlagen im Betrieb. Diese Trennung ermöglicht die Wiederverwendung von Produktinformationen bei gleichzeitiger individueller Beschreibung einzelner Anlageninstanzen. Besondere Bedeutung kommt den standardisierten Submodellen der Industrial Digital Twin Association (IDTA) zu. Sie schaffen eine gemeinsame semantische Grundlage für die Beschreibung von Komponenten unterschiedlicher Hersteller und ermöglichen die Wiederverwendbarkeit von Informationen über Unternehmensgrenzen hinweg (vgl. IDTA, 2024). Im weiteren Projektverlauf dienen Verwaltungsschalen nicht nur als Informationscontainer, sondern auch als Referenzpunkte für Daten, Dienste und Analyseergebnisse. Ergebnisse aus Monitoring- und Auslegungsdiensten lassen sich standardisiert referenzieren und in Engineering- sowie Asset-Management-Prozesse integrieren. Damit fungiert die **AAS als semantisches Rückgrat des Datenraums**: Sie verbindet Produktdaten, Betriebsinformationen und Serviceergebnisse in einem gemeinsamen Informationsmodell und unterstützt Interoperabilität sowie Wiederverwendbarkeit.

4.3 Standardisierte Kommunikation mit OPC UA

Während die Verwaltungsschale die semantische Beschreibung von Informationen ermöglicht, adressiert **OPC UA** die standardisierte Kommunikation zwischen den beteiligten Systemen. OPC UA wurde im Projekt als zentraler Kommunikationsstandard eingesetzt (vgl. IEC, 2025; IEC, 2021) und bildet die Schnittstelle zwischen Feldgeräten, Edge-Systemen und übergeordneten Diensten (OPC Foundation / IEC 62541). Ein wesentlicher Vorteil von OPC UA liegt in der **Kombination aus Kommunikationsmechanismus und Informationsmodell**. Daten werden nicht lediglich übertragen, sondern gleichzeitig strukturiert beschrieben. Dadurch wird eine konsistente Interpretation der Informationen durch unterschiedliche Systeme ermöglicht. Im Demonstrator wurden die relevanten Betriebsgrößen der Antriebssysteme – darunter Drehzahl, Drehmoment, Strom, Spannung und Temperatur – über OPC-UA-Server bereitgestellt. Die Daten standen dadurch nicht nur für lokale Anwendungen zur Verfügung, sondern konnten zugleich standardisiert in die Edge-Infrastruktur integriert werden. Die Nutzung von OPC UA ermöglichte eine herstellerübergreifende Kommunikation, bei der nicht nur Messwerte übertragen, sondern auch deren semantische Beschreibung bereitgestellt wurde. Dadurch entstand eine konsistente Informationsbasis für die spätere Nutzung im Datenraum und den darauf aufbauenden Diensten. Die **Kombination aus OPC UA und Verwaltungsschalen** verbindet semantische Beschreibung und operative Kommunikation.

4.4 Semantische Integration und Wissensrepräsentation

Die Verfügbarkeit standardisierter Datenmodelle allein genügt nicht, um Informationen unterschiedlicher Quellen automatisch miteinander zu verknüpfen. Aus diesem Grund wurden im Projekt semantische Technologien eingesetzt, die Informationen über gemeinsame Bedeutungsmodelle miteinander verbinden. Zur Umsetzung der semantischen Integration wurden unterschiedliche Technologien miteinander kombiniert. Für die standardisierte Beschreibung von Produkteigenschaften und Merkmalen wurden ECLASS-konforme Merkmalsstrukturen verwendet (vgl. ECLASS e.V., 2025). Diese Merkmalsbeschreibungen auf Basis von ECLASS ermöglichten eine einheitliche Beschreibung technischer Eigenschaften. Ergänzend wurden RDF-basierte Datenmodelle und Linked-Data-Konzepte eingesetzt, um Informationen unterschiedlicher Herkunft in einen gemeinsamen semantischen Kontext zu überführen. Die daraus entstehenden Wissensgraphen erlauben es, Beziehungen zwischen Komponenten, Prozessen und Diensten explizit abzubilden sowie Informationen systemübergreifend auszuwerten und zu interpretieren. Die semantische Integration bildet damit eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung interoperabler Datenraumdienste, indem sie die **automatische Zuordnung technischer Eigenschaften**, die **Verknüpfung von Produkt- und Betriebsdaten**, die **standardisierte Referenzierung von Analyseergebnissen** sowie die **herstellerübergreifende Interpretation von Informationen** ermöglicht.

4.5 Edge Computing, Cloud Computing und föderierte Datenräume

Eine weitere zentrale Erkenntnis aus Industrie-4.0-Anwendungen betrifft die Verteilung von Datenverarbeitung und Analysefunktionen. Im Projekt wurde deshalb bewusst das Zusammenspiel von **Edge Computing, Cloud Computing und föderierten Datenraumtechnologien** verfolgt (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023). Die Edge-Ebene übernimmt die lokale Erfassung, Speicherung und Vorverarbeitung von Betriebsdaten. Containerisierte Komponenten erfassen die Daten angeschlossener Antriebssysteme und stellen sie für nachgelagerte Dienste bereit.

Die lokale Speicherung hochaufgelöster Rohdaten ermöglicht zeitkritische Anwendungen mit minimalen Latenzen und gewährleistet zugleich, dass die Daten unter der Kontrolle des jeweiligen Anlagenbetreibers verbleiben. Dadurch werden **Datensouveränität und Datenschutz** unterstützt, während gleichzeitig eine flexible Grundlage für lokale und datenraumgestützte Analysefunktionen entsteht. Cloud-Dienste ergänzen die Edge-Ebene um skalierbare Analyse- und Servicefunktionen, beispielsweise für Monitoring, Verifikation oder Auslegung. Die organisationsübergreifende Verknüpfung erfolgt über einen im Projekt untersuchten föderierten Datenraum auf Basis von Solid-Technologien. Informationen verbleiben grundsätzlich beim jeweiligen Eigentümer und werden ausschließlich autorisierten Nutzern oder Diensten bereitgestellt.

Die Abbildung veranschaulicht die sichere Vernetzung der im Demonstrator eingesetzten Edge-Umgebungen mit zentralen Ressourcen des Reallabors. Über die Firewall- und VPN-Infrastruktur konnten verteilte Antriebssysteme organisationsübergreifend eingebunden werden, ohne bestehende lokale Netzstrukturen aufzugeben. Dadurch wurde die **standortübergreifende Bereitstellung und Nutzung datenraumgestützter Funktionen** unter realitätsnahen Bedingungen ermöglicht.

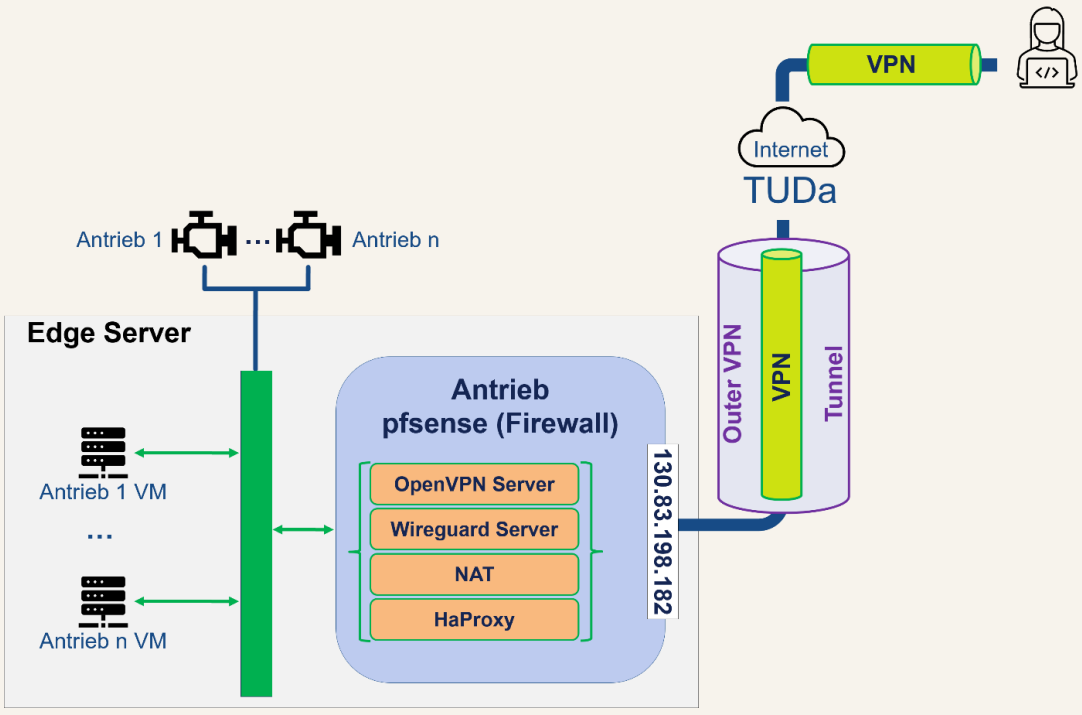


Abbildung 5: Sichere Vernetzung der Demonstratorumgebung über VPN

Sichere Kopplung verteilter Edge-Umgebungen mit zentralen Ressourcen des Reallabors über eine VPN-basierte Kommunikationsinfrastruktur

Ein zentrales Ziel des Reallabors war die **Integration hersteller- und standortübergreifender Antriebssysteme** unter realitätsnahen Bedingungen. Hierfür wurde eine virtualisierte Edge-Infrastruktur aufgebaut, die lokale Demonstratoren, Remote-Systeme und Datenraumdienste über abgesicherte Kommunikationskanäle verknüpft. Durch Virtualisierung, VPN-Technologien und dedizierte Gateways konnten unterschiedliche Standorte flexibel in die gemeinsame Test- und Entwicklungsumgebung eingebunden werden. Die Infrastruktur bildete damit die Grundlage für die Integration von Datenraumdiensten sowie die standortübergreifende Validierung der Referenz-Use-Cases.

Die **föderierte Datenraumumgebung** basiert auf mehreren komplementären Komponenten. WebIDs übernehmen die eindeutige Identifikation von Personen, Organisationen und Diensten innerhalb des Datenraums. Die Zugriffskontrolle erfolgt über Access Control Lists (ACL), mit denen Dateneigentümer präzise festlegen können, welche Informationen für welche Akteure zugänglich sind. Die eigentlichen Daten werden in Solid Pods verwaltet, die als dezentrale Speicherorte für Daten und Metadaten fungieren. Ergänzend sorgen Daten- und Servicekataloge dafür, dass verfügbare Ressourcen innerhalb des Datenraums auffindbar und für autorisierte Nutzer nutzbar werden.

Die im Reallabor umgesetzte **Referenzarchitektur** folgt dem Prinzip einer funktionalen Aufgabenteilung zwischen Edge und Cloud. Während die Edge-Ebene die Datenerfassung, lokale Verarbeitung und Datenhoheit sicherstellt, ermöglicht die Cloud die Bereitstellung skalierbarer Dienste sowie die Umsetzung datenraumgestützter Analyse- und Mehrwertfunktionen. Erst das Zusammenspiel beider Ebenen schafft die Grundlage für leistungsfähige und souveräne datengetriebene Services.

Edge	Cloud
Datenerfassung	Servicebereitstellung
Rohdatenhaltung	Analytics
OPC-UA-Anbindung	Aggregation
Vorverarbeitung	Datenraumdienste
Lokale Datenhoheit	Skalierung

Tabelle 2: Warum Edge und Cloud gemeinsam benötigt werden

Aufgabenverteilung zwischen Edge und Cloud in der Referenzarchitektur von Antrieb 4.0

4.6 Deterministische Kommunikation mit TSN und PTP

Mit zunehmender Vernetzung steigen die Anforderungen an die Qualität industrieller Kommunikationsnetze. Insbesondere für zeitkritische Anwendungen reichen klassische Ethernet-Netzwerke häufig nicht aus, da Übertragungszeiten und Paketlaufzeiten nicht deterministisch garantiert werden können. Im Projekt wurde deshalb die Nutzung von **Time Sensitive Networking (TSN)** untersucht. TSN erweitert klassische Ethernet-Netzwerke um zusätzliche Mechanismen zur kontrollierten und deterministischen Datenübertragung. Zur Realisierung deterministischer Kommunikationsbeziehungen wurden Konzepte des IEEE-802.1-TSN-Standards berücksichtigt (vgl. IEEE, 2025). TSN ermöglicht deterministische Kommunikation. Ergänzt wird dies durch Synchronisationsmechanismen, die eine gemeinsame Zeitbasis für verteilte Systeme schaffen. Dadurch können auch anspruchsvolle industrielle Anwendungen mit hohen Anforderungen an Vorhersagbarkeit und Kommunikationsqualität auf standardisierten Ethernet-Infrastrukturen realisiert werden.

Ergänzend wurde das **Precision Time Protocol (PTP)** eingesetzt, um eine gemeinsame Zeitbasis über alle beteiligten Komponenten hinweg bereitzustellen. PTP ermöglicht eine hochgenaue Synchronisation verteilter Uhren in Ethernet-basierten Automatisierungsnetzen (vgl. IEEE, 2019). Gemeinsam ermöglichen TSN und PTP eine garantierte Übertragung mit begrenzter Latenz und geringem Jitter auch in gemeinsam genutzten Ethernet-Netzwerken (vgl. IEEE, 2025). Dadurch können Messwerte unterschiedlicher Systeme präzise korreliert und zeitkritische Kommunikationsprozesse zuverlässig realisiert werden. Die Untersuchungen im Demonstrator zeigten eine **deutliche Verbesserung der Vorhersagbarkeit und Stabilität der Kommunikation** gegenüber konventionellen Netzwerken.

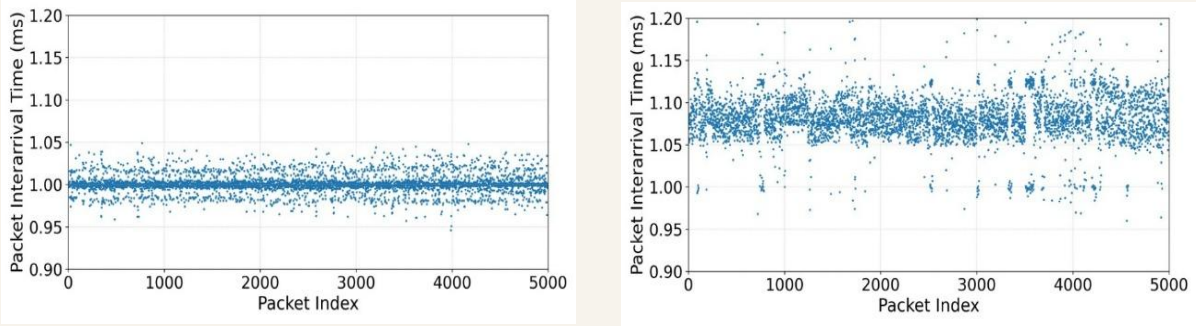


Abbildung 6: Kommunikationsqualität mit und ohne Time-Sensitive Networking (TSN)

Vergleich der Kommunikationsqualität mit und ohne Time-Sensitive Networking (TSN): Einfluss von TSN auf Jitter und Übertragungsstabilität (links); Einfluss auf Jitter und Übertragungsstabilität ohne TSN (rechts)

Die Gegenüberstellung verdeutlicht die Auswirkungen von Time-Sensitive Networking (TSN) auf die Kommunikationsqualität verteilter industrieller Systeme. In Kombination mit dem Precision Time Protocol (PTP) konnten im Demonstrator eine verbesserte zeitliche Synchronisation, eine höhere Vorhersagbarkeit der Datenübertragung sowie eine Reduzierung von Latenzschwankungen erreicht werden. Die Ergebnisse bestätigen die Eignung Ethernet-basierter Standards für zeitkritische und interoperable Industrie-4.0-Anwendungen.

4.7 Das Reallabor als Integrationsplattform

Die beschriebenen Technologien wurden im Projekt nicht isoliert betrachtet, sondern innerhalb eines gemeinsamen Reallabors integriert und unter realitätsnahen Bedingungen erprobt. Das **Reallabor Antrieb 4.0** fungiert als offene Integrations- und Validierungsplattform, in der Verwaltungsschalen, OPC-UA-Kommunikation, semantische Informationsmodelle, Datenraumtechnologien sowie Edge- und Cloud-Dienste in einer gemeinsamen Umgebung zusammengeführt wurden. Ergänzt wurde diese Infrastruktur durch moderne Kommunikationsverfahren wie TSN und PTP. Dadurch entstand eine technische Umgebung, in der nicht nur einzelne Technologien untersucht werden konnten, sondern insbesondere deren **Zusammenwirken innerhalb eines interoperablen Industrie-4.0-Ökosystems**.

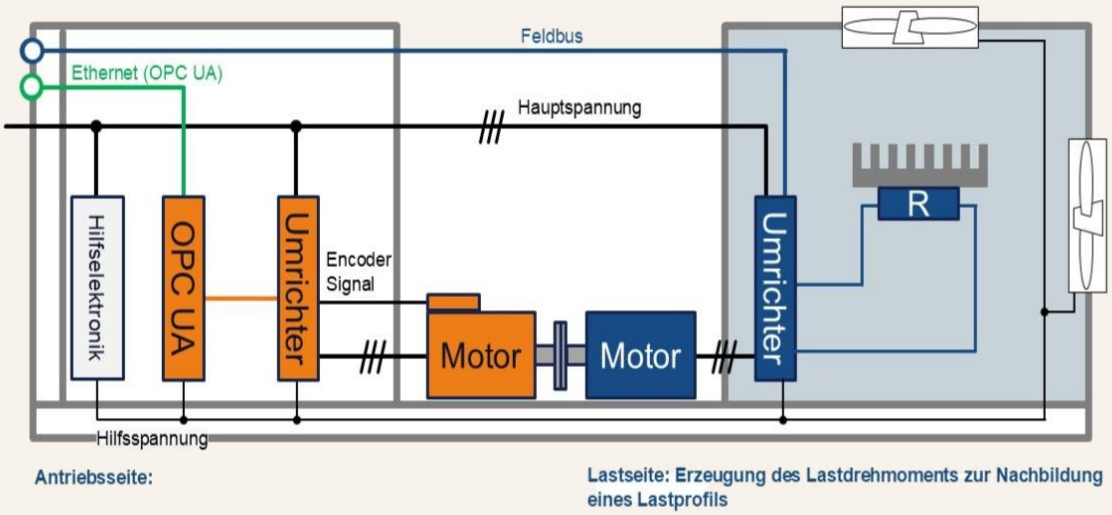


Abbildung 7: Versuchsaufbau des Antriebsdemonstrators

Aufbau der Demonstratormodule zur Nachbildung realitätsnaher Betriebs- und Lastbedingungen

Als physische Grundlage des Reallabors wurde ein modularer Hardware-Demonstrator aufgebaut, der die wesentlichen Komponenten eines industriellen Antriebssystems in einer kontrollierten Versuchsumgebung abbildet. Die Architektur ermöglicht die Nachbildung unterschiedlicher Lastprofile sowie die Erfassung relevanter Betriebsgrößen über standardisierte Kommunikationsschnittstellen. Dadurch können Technologien und Dienste unter reproduzierbaren Bedingungen untersucht und validiert werden. Der **besondere Mehrwert des Reallabors** liegt in der integrierten Validierung aller Technologien innerhalb eines gemeinsamen Industrie-4.0-Ökosystems.

Stimme aus dem Projekt

“Mit Antrieb 4.0 verfolgen wir das Ziel, den Weg für standardisierte Daten eines Antriebs zu ebnen, der jederzeit identifizierbar ist.

Das klingt erst einmal trivial, ist es aber nicht.”



Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog ist Professor und Leiter des Fachgebiets Leistungselektronik und Antriebsregelung an der Technischen Universität Darmstadt. Im Projekt Antrieb 4.0 bringt er seine langjährige Expertise in den Bereichen Leistungselektronik, Antriebstechnik und Standardisierung ein.
Im Gespräch erläutert er die Bedeutung offener Standards, digitaler Zwillinge und interoperabler Schnittstellen für zukünftige datenraumfähige Antriebssysteme.

Prof. Dr. Gerd Griepentrog,

TU Darmstadt · Professor und Leiter des Fachgebiets Leistungselektronik und Antriebsregelung

Antriebe sind die Kernkomponente in der industriellen Produktion. Wo stehen wir aktuell, wenn es um die Themen Digitalisierung und Transparenz rund um elektrische Antriebe geht?

Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog: Meine Wahrnehmung ist, dass gerade im Bereich der Antriebstechnik in den letzten Jahren sehr viel passiert ist. Die Unternehmen haben sich stark diversifiziert. Viele Firmen bedienen bestimmte Nischen und haben sich beispielsweise auf die Nahrungsmittelindustrie oder Prozessindustrie spezialisiert. Die großen Player bedienen eher die Multi-Purpose-Themen. Neben der Fokussierung auf ein bestimmtes Kundensegment stand auch die Entwicklung vieler Tools rund um den elektrischen Antrieb nicht still.

Im Zuge der Digitalisierung sind beispielsweise Projektionstools, Tools zum Energieverbrauch oder Tools für das Design des Antriebs entstanden. Diese Tools erleichtern es dem Anwender in der Praxis, den entsprechenden Antrieb zu planen und einzusetzen.

Aber trotz der intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit gibt es immer noch keinen gemeinsamen Standard für die Auswahl, die Inbetriebnahme, den Betrieb oder den Service von Antrieben. Das heißt, es ist für den Kunden immer noch sehr aufwändig, Antriebe unterschiedlicher Hersteller miteinander zu kombinieren.
Hier sehe ich ein großes Potential für die Integratoren von elektrischen Antrieben. **Wir brauchen offene Standards und interoperable Lösungen.**
[...]

In der Zusammenfassung heißt das, dass es aktuell die Situation vieler guter und kundenorientierter Lösungen einzelner Unternehmen gibt, aber immer noch ein gewisses Inseldenken vorherrscht. Unsere Aufgabe ist es nun, die Inseln zu verbinden und für Interoperabilität und gemeinsame Standards zu sorgen.

Das Konzept des digitalen Zwillings ist im Zusammenhang mit der Erforschung herstellerneutraler Lösungen von zentraler Bedeutung. Welchen Beitrag leistet der Standard der sogenannten Verwaltungsschale und ihrer Submodelle, wenn es um das Aufbrechen proprietärer Strukturen geht? Was sind hier besondere Herausforderungen aus Perspektive der Leistungselektronik?

Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog: Die Verwaltungsschale hat sich im Konsortium als der Standard für den digitalen Zwilling etabliert und wurde schon bei den Vorarbeiten, also im Rahmen des ZVEI-Projektes „Demonstrator Antrieb 4.0“ verwendet. Dort wurde erstmals die Interoperabilität elektrischer Antriebe als Industrie 4.0-Komponente erprobt. Die Verwaltungsschale hat sich also als ein gutes und verlässliches Instrument für die digitale Repräsentation eines Assets bewährt, auch wenn es sicherlich noch andere Strukturen dafür gibt.

Mit Hilfe der Verwaltungsschale kann ich den digitalen Zwilling für die Industrie 4.0 umsetzen und beispielsweise den gesamten Lebenszyklus von Geräten, Maschinen oder Anlagen digital abbilden. Sie ist der Frame des Ganzen und legt den Grundstein für eine herstellerübergreifende Interoperabilität und für gemeinsame Standards.
[...]
Unser Ziel ist es nun, mit Hilfe der Verwaltungsschale einen vollständigen, virtuellen, digitalen Zwilling mit allen Domänen zu erreichen, um dort alle wichtigen Themen wie beispielsweise die Mechanik, die Elektrotechnik, die Thermik oder die Lebensdauer elektrischer Antriebe abzubilden. Als herausfordernd sehe ich, dass es inzwischen einige Firmen auf dem Markt gibt, die es in diesem Feld schon sehr weit gebracht haben.

Wir müssen aufpassen, nicht überholt zu werden. Unsere Aufgabe ist es nun, die Daten der Antriebe in einem entsprechend standardisierten Format aufzubereiten und übergeben zu können. Und wir müssen für standardisierte Schnittstellen sorgen. Jedem Nutzer und jeder Nutzerin muss am Ende klar sein, was da genau hinterlegt ist, sonst vergleichen wir am Ende Äpfel mit Birnen. Und das ist alles andere als trivial.

Als Konsortialpartner sind Sie maßgeblich an der Entwicklung des Reallabor-Demonstrators beteiligt. Können Sie uns darüber etwas mehr erzählen?

Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog: Mit unseren beiden Use Cases „Digitalisiertes Asset Management“ und „Energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen“ möchten wir dringend benötigte Lösungsansätze für mehr Effizienz, Nachhaltigkeit, Flexibilität und Kostenersparnisse liefern und diese prototypisch in dem Reallabor-Demonstrator umsetzen.

Dafür und auch um unserem wissenschaftlichen Anspruch im Bereich der Leistungselektronik und Antriebsregelung gerecht zu werden, waren im Vorfeld zunächst Forschungsarbeiten an verschiedenen Technologien notwendig. So haben wir uns beispielsweise für Time Sensitive Networking (TSN) entschieden, um die deterministische Übertragung zeitkritischer Daten in Ethernet-Netzen zu ermöglichen.
[...]
Der Reallabor-Demonstrator wird am Ende aus elf kleineren Demonstratoren bestehen, in denen jeweils ein Antriebssystem eines Projektpartners mit einer Lastmaschine aufgebaut wird.
Unsere assoziierten Partner bauen die Demonstratoren bei sich vor Ort auf und übernehmen die Programmierung und Installation ihrer Software selbst, um möglichst viele Erfahrungen zu sammeln. Wir auf der Wissenschaftsseite sorgen für standardisierte Softwareschnittstellen.

Die Ausrichtung an der Praxis ist wichtig, da sich viele Probleme – beispielsweise bei unterschiedlichen Datenmodellen – erst im realen Betrieb zeigen. Aber auch Themen wie Datensicherheit, Datenintegrität, Echtzeitfähigkeit oder Kostenoptimierung spielen eine wichtige Rolle. Alle Erfahrungen und Lösungsansätze fließen anschließend in den standortübergreifenden Demonstrator ein.

Für den Anlagen- oder Maschinenbauer ist eine Menge Kleinarbeit notwendig, um alle für die Inbetriebnahme einer Maschine oder Anlage richtigen Einstellungen zu finden. Welchen Beitrag leistet das Forschungsprojekt in diesem Kontext?

Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog: Mit Antrieb 4.0 verfolgen wir das Ziel, den Weg für standardisierte Daten eines Antriebs zu ebnen, der jederzeit identifizierbar ist. Das klingt erst einmal trivial, ist es aber nicht.
Wenn Sie sich heute in einer großen Fabrik bewegen, haben Sie es mit tausenden von Antrieben unterschiedlicher Hersteller zu tun. Da den Überblick zu behalten, welcher Antrieb gerade läuft und interagiert, ist eine Mammutaufgabe. Heutzutage herrscht nach wie vor die geführte Inbetriebsetzung vor. Hier setzen wir mit Antrieb 4.0 an und möchten unter anderem für eine einfache, reibungslose automatische Inbetriebsetzung sorgen.
[...]
An dieser Stelle würde sich der Einsatz der Künstlichen Intelligenz übrigens gut eignen, gerade in Verbindung mit der Cloud. In diesem Szenario führt der Antrieb eine Aufgabe aus, diese wird in Form von Metadaten in die Cloud übertragen und kann mit Vergleichswerten anderer Antriebe abgeglichen werden, um Optimierungspotenziale aufzuzeigen.
KI-Algorithmen sind vorrangig Cloud-Themen. Das kann ich nicht auf dem Antrieb selbst rechnen. Bei Antrieben gilt es außerdem immer Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen. Wenn ein Antrieb plötzlich ungewollt anfängt, sich zu drehen, kann das katastrophale Folgen haben und Menschenleben gefährden. Die Antriebe mit Künstlicher Intelligenz zu koppeln, wäre aber eine sehr interessante Forschungsfrage, die ich mir gut für ein Folgeprojekt vorstellen könnte.

Herr Griepentrog, wir danken Ihnen für das Gespräch!

Das Interview wurde von Ute Fertig geführt und am 15. Juli 2024 veröffentlicht auf www.antrieb40.de.

5. Die Architektur: Vom Feldgerät zum Datenraum

Die in Kapitel 2 beschriebenen **Referenz-Use-Cases** und die daraus abgeleiteten Service-Propositions stellen hohe Anforderungen an die technische Infrastruktur. Informationen müssen über Unternehmensgrenzen hinweg austauschbar sein, ohne dass die Kontrolle über Daten verloren geht. Gleichzeitig müssen Engineering-, Produkt- und Betriebsdaten über den gesamten Lebenszyklus eines Antriebssystems hinweg miteinander verknüpft und von digitalen Diensten unterschiedlicher Hersteller konsistent interpretiert werden können. Die **Architektur des Datenraums Antrieb 4.0** wurde entwickelt, um diese Anforderungen zu erfüllen. Sie basiert auf OPC UA, Asset Administration Shells (AAS), Edge Computing, semantischen Informationsmodellen und föderierten Datenraumkonzepten. Ziel war nicht die Entwicklung einer weiteren zentralen Plattform, sondern der **Nachweis einer interoperablen Referenzarchitektur** auf Basis etablierter Standards und Technologien. Damit schafft sie die Grundlage für datenraumgestützte Dienste wie Digital Asset Management, Design Verification und die energieeffiziente Auslegung.

Die Architektur wurde konsequent aus den Anforderungen der Referenz-Use-Cases und der angestrebten datengetriebenen Services abgeleitet. Die folgenden Abschnitte erläutern die **wesentlichen Architekturentscheidungen** sowie deren praktische Umsetzung im Reallabor Antrieb 4.0.

5.1 Designprinzipien und Technologiestack

Bereits während der **Use-Case-Analyse** zeigte sich, dass klassische Plattformansätze mit zentraler Datenhaltung den Anforderungen industrieller Wertschöpfungsnetzwerke nur eingeschränkt gerecht werden. Betreiber, Maschinenbauer, Komponentenhersteller und Serviceanbieter verfügen über eigene Datenbestände, Verantwortlichkeiten und Geschäftsinteressen. Gleichzeitig müssen Informationen organisationsübergreifend nutzbar gemacht werden (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023; Plattform Industrie 4.0, 2026a). Aus diesem Grund basiert die Architektur auf **vier zentralen Designentscheidungen**: Daten werden dezentral gehalten, Informationen semantisch beschrieben, Daten und Dienste als eigenständige Ressourcen betrachtet und die Integration konsequent über offene Industriestandards realisiert, um die Anschlussfähigkeit an Initiativen wie Manufacturing-X und Gaia-X sicherzustellen (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023; Plattform Industrie 4.0, 2026a). Daraus entstand ein mehrstufiges Architekturmodell, das vom physischen Asset über lokale Edge-Systeme und Datenraum-Connectoren bis hin zu datenraumgestützten Diensten reicht. Die **Referenzarchitektur** orientiert sich an den Gestaltungsprinzipien Interoperabilität, Datensouveränität, Föderation, Serviceorientierung und Standardisierung, die zugleich den Rahmen für die praktische Umsetzung im Reallabor Antrieb 4.0 bilden.

Prinzip	Zielsetzung
Interoperabilität	Herstellerübergreifende Nutzung von Daten und Services
Datensouveränität	Daten verbleiben beim jeweiligen Eigentümer
Föderation	Keine zentrale Speicherung aller Informationen
Serviceorientierung	Daten als Grundlage für digitale Mehrwertservices
Standardisierung	Nutzung etablierter Industrie-4.0-Standards

Tabelle 3: Architekturprinzipien des Datenraums Antrieb 4.0

5.2 Systemarchitektur des Datenraums Antrieb 4.0

Die Umsetzung der **Referenz-Use-Cases** erforderte eine Architektur, die sowohl die Erfassung und Verarbeitung von Betriebsdaten als auch deren semantische Beschreibung und kontrollierte Bereitstellung innerhalb eines Datenraums unterstützt. Gleichzeitig mussten die Anforderungen unterschiedlicher Akteure – von Komponentenherstellern über Maschinenbauer bis hin zu Anlagenbetreibern und Serviceanbietern – berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund wurde eine **mehrschichtige Referenzarchitektur** entwickelt, die etablierte Industrie-4.0-Technologien wie OPC UA, Asset Administration Shells (AAS) und semantische Informationsmodelle mit den Prinzipien föderierter Datenräume verbindet. Ziel ist die Schaffung eines **durchgängigen Informationsraums**, in dem Daten, Metadaten und Dienste organisationsübergreifend auffindbar, interpretierbar und nutzbar werden, ohne die Datensouveränität der beteiligten Akteure zu beeinträchtigen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022; FX Consortium, 2024). Die Architektur vereint physische Antriebssysteme, Edge-Komponenten, Verwaltungsschalen, Datenraum-Connectoren und datenraumgestützte Dienste. Die föderierte Struktur ermöglicht die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen bei gleichzeitigem Erhalt der Datensouveränität. Der Aufbau folgt einer **durchgängigen vertikalen Informationskette**. Die Kommunikation basiert auf den Konzepten der serviceorientierten Architektur von OPC UA (vgl. IEC 62541, 2025). Betriebsdaten entstehen auf der Feldebene, werden über OPC UA erfasst, auf der Edge-Ebene verarbeitet und über Verwaltungsschalen semantisch beschrieben. Datenraum-Connectoren machen diese Informationen organisationsübergreifend nutzbar und ermöglichen die Integration digitaler Dienste. Dadurch entsteht ein konsistenter Informationsfluss vom physischen Asset bis hin zu datenraumgestützten Mehrwertdiensten.

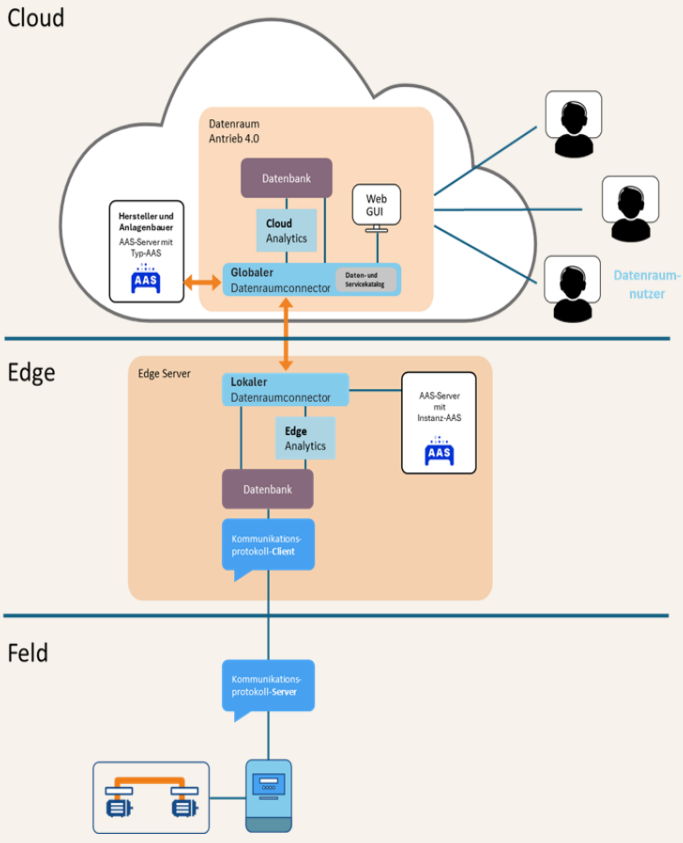


Abbildung 8: Referenzarchitektur des Demonstrators Antrieb 4.0

Die Abbildung zeigt wesentliche Komponenten der im Projekt umgesetzten Referenzarchitektur – von der Anbindung physischer Assets über die lokale Edge-Verarbeitung bis hin zur Bereitstellung datenraumgestützter Dienste. Verwaltungsschalen, Connectoren und Analysefunktionen ermöglichen die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen, während die Datenhoheit bei den jeweiligen Akteuren verbleibt.

5.2.1 Feldebene

Die **Feldebene** umfasst die physikalischen Komponenten des Demonstrators und bildet die Quelle sämtlicher Betriebs- und Zustandsinformationen. Im Projekt wurden elektrische Antriebssysteme bestehend aus Umrichter, Motor, Sensorik und Lastmaschine eingesetzt. Die Komponenten erzeugen kontinuierlich Betriebsdaten wie Drehzahl, Drehmoment, Stromaufnahme, Spannungsverläufe, Temperaturen sowie weitere zustandsrelevante Messgrößen. Die Anbindung erfolgt über OPC-UA-Server, die sowohl den Zugriff auf aktuelle Prozessdaten als auch auf strukturierte Geräteinformationen ermöglichen. Durch die Nutzung standardisierter Informationsmodelle können die Daten bereits auf Feldebene semantisch beschrieben und für nachgelagerte Anwendungen konsistent bereitgestellt werden. Damit wird die Grundlage für die herstellerübergreifende Integration unterschiedlicher Komponenten geschaffen.

5.2.2 Edge-Ebene

Die **Edge-Ebene** übernimmt die Rolle einer lokalen Daten- und Integrationsplattform als Verbindung zwischen operativer Technologie (OT), Informationstechnologie (IT) und den datenraumbezogenen Diensten. Hier werden die von den OPC-UA-Servern bereitgestellten Informationen gesammelt, gespeichert und für weitere Anwendungen aufbereitet. Damit stellt die Edge-Ebene einen zentralen Baustein der Datensouveränität dar. Im Demonstrator kamen hierzu virtualisierte Edge-Systeme zum Einsatz, die sowohl lokale Datenbanken als auch Analyse- und Integrationsdienste bereitstellen. Die Speicherung der Betriebsdaten erfolgt in lokalen Datenbanken, wodurch hochaufgelöste Messwerte auch über längere Zeiträume verfügbar bleiben. Gleichzeitig können Daten bereits auf der Edge-Ebene vorverarbeitet, aggregiert und qualitätsgesichert werden. Dies reduziert die zu übertragenden Datenmengen und ermöglicht zeitkritische Anwendungen unabhängig von Cloud-Verbindungen.

5.2.3 Edge Services

Auf der Edge-Infrastruktur werden verschiedene Dienste bereitgestellt, die unmittelbar auf lokale Datenquellen zugreifen können. Hierzu gehören Funktionen zur Datenaggregation, Vorverarbeitung, Analyse sowie Dienste zur Generierung von Metadaten und Verwaltungsschaleninhalten. Darüber hinaus werden Asset-spezifische Informationen mit Betriebsdaten verknüpft und für die spätere Nutzung innerhalb des Datenraums vorbereitet. Die **Edge Services** übernehmen damit die erste semantische und funktionale Anreicherung der Rohdaten und schaffen die Grundlage für höherwertige datenraumgestützte Anwendungen.

5.2.4 Edge-Connectoren

Die **Edge-Connectoren** bilden die Schnittstelle zwischen lokalen Ressourcen und dem föderierten Datenraum. Sie stellen Informationen über verfügbare Datenquellen, Verwaltungsschalen und Dienste bereit und ermöglichen deren kontrollierte Veröffentlichung innerhalb des Datenraums. Neben der Datenbereitstellung übernehmen die Connectoren die Verwaltung von Metadaten, Identitäten und Zugriffsrechten. Ressourcen werden über eindeutige Identifikatoren (URIs) referenzierbar gemacht und können dadurch organisationsübergreifend adressiert werden.

5.2.5 Globaler Datenraum-Connector

Der **globale Datenraum-Connector** fungiert als Vermittlungsinstanz zwischen den einzelnen Teilnehmern des Datenraums. Er stellt Funktionen zur Auffindbarkeit von Ressourcen, zur Verwaltung von Metadaten sowie zur Identifikation verfügbarer Dienste bereit. Im Gegensatz zu klassischen Plattformarchitekturen erfolgt keine zentrale Speicherung der Betriebsdaten. Stattdessen werden ausschließlich Referenzen, Metadaten und Zugriffsinformationen verwaltet. Dadurch bleibt die Datenhoheit jederzeit beim jeweiligen Eigentümer. Die Architektur folgt damit konsequent den Prinzipien föderierter Datenräume und entspricht den grundlegenden Konzepten von Gaia-X und Manufacturing-X.

5.2.6 Typ- und Instanzverwaltungsschalen als vertikale Integrationsebene

Eine Besonderheit der Architektur besteht in der **durchgängigen Nutzung von Verwaltungsschalen** über sämtliche Ebenen hinweg. Typ-Verwaltungsschalen stellen standardisierte Informationen zu Produkten, Komponenten und Geräten bereit und werden typischerweise durch Hersteller gepflegt. Instanz-Verwaltungsschalen beschreiben konkrete Anlagen oder Komponenten im Betrieb und enthalten Referenzen auf Betriebsdaten, Zustandsinformationen oder Analyseergebnisse. Die Verwaltungsschalen fungieren als semantische Integrationsanker der Architektur und sind mithilfe der Datenraum-Connectoren miteinander vernetzt. Sie verbinden technische Stammdaten, Betriebsinformationen und digitale Dienste innerhalb eines gemeinsamen Informationsmodells und ermöglichen die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Antriebssystems.

Die Verwaltungsschalen dienen dabei nicht lediglich als digitale Dokumentation, sondern bilden den **zentralen Bezugspunkt für Daten, Dienste und Beziehungen** innerhalb des Datenraums. Die im Projekt entwickelten Services zur energieeffizienten Auslegung und Auslegungsverifikation nutzen Verwaltungsschalen sowohl zur Bereitstellung von Informationen als auch zur Persistierung von Ergebnissen. Dadurch entsteht eine durchgängige Informationskette über den gesamten Lebenszyklus eines Antriebssystems hinweg (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; IDTA, 2024).

5.2.7 Cloud Services

Auf der **obersten Ebene der Architektur** befinden sich die datenraumgestützten Dienste und Analyseanwendungen. Diese greifen nicht direkt auf lokale Datenbanken zu, sondern nutzen die über Verwaltungsschalen und Connectoren bereitgestellten Ressourcen. Hierzu zählen insbesondere die im Projekt umgesetzten Dienste für Digital Asset Management, Design Verification sowie die energieeffiziente Auslegung von Antriebssystemen. Die Dienste kombinieren Informationen unterschiedlicher Teilnehmer und erzeugen daraus neue Erkenntnisse, Analysen und Handlungsempfehlungen. Die Architektur trennt damit bewusst zwischen Datenhaltung, Datenbereitstellung und Datennutzung. Dadurch entsteht eine skalierbare Serviceplattform, die zukünftige datenbasierte Geschäftsmodelle und Mehrwertdienste unterstützen kann.

Vertikale Informationskette im Datenraum Antrieb 4.0

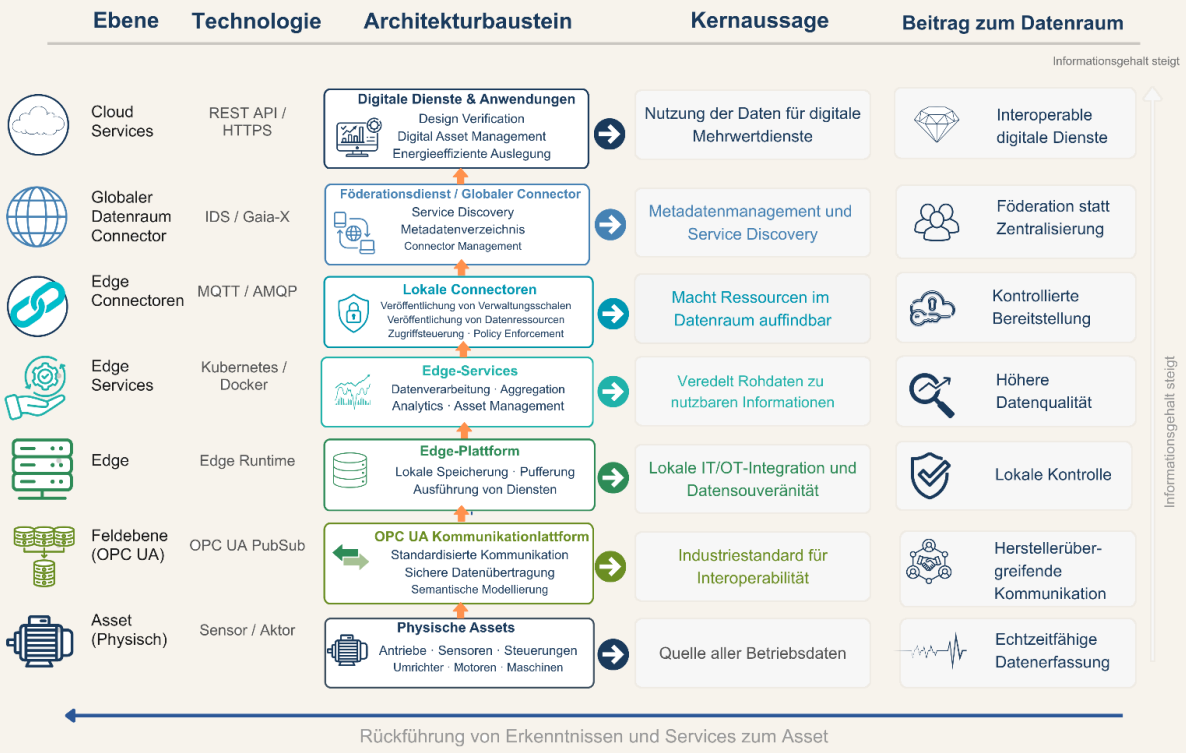


Abbildung 9: Referenzarchitektur des Datenraums Antrieb 4.0
Vertikale Informationskette vom physischen Asset zum datenraumgestützten Dienst

Kernprinzip der Architektur: Daten werden entlang der Informationskette schrittweise von Rohdaten zu nutzbaren Informationen und schließlich zu digitalen Diensten transformiert. Gleichzeitig verbleiben die zugrunde liegenden Daten beim jeweiligen Eigentümer und werden ausschließlich kontrolliert über den Datenraum bereitgestellt. Die technische Vernetzung allein genügt jedoch nicht, um Interoperabilität zwischen Unternehmen, Systemen und Diensten zu erreichen. Entscheidend ist die Fähigkeit, Informationen organisationsübergreifend einheitlich zu interpretieren. Daher kommt **Verwaltungsschalen als semantischem Fundament** der Architektur eine besondere Bedeutung zu.

5.3 Semantische Integration als Grundlage der Interoperabilität

Eine zentrale Herausforderung interoperabler Industrie-4.0-Systeme besteht nicht in der Übertragung von Daten, sondern in deren konsistenter Interpretation. Zur Lösung dieser Herausforderung wurden **Asset Administration Shells (AAS)** als semantische Integrationsanker der Architektur eingesetzt. Verwaltungsschalen beschreiben Assets über standardisierte Submodelle und schaffen einen gemeinsamen semantischen Kontext. Ihre Interoperabilität basiert auf standardisierten Merkmalsdefinitionen und semantischen Beschreibungen gemäß ECLASS (vgl. ECLASS e.V., 2025). Im Projekt wurden sowohl Typ- als auch Instanz-Verwaltungsschalen eingesetzt. Typ-Verwaltungsschalen enthalten herstellerseitig bereitgestellte Informationen zu Produkten und Komponenten. Instanz-Verwaltungsschalen beschreiben konkrete Anlagen oder Komponenten im Betrieb und enthalten beispielsweise Konfigurations-, Betriebs- oder Wartungsinformationen. Verwaltungsschalen dienen dabei nicht lediglich als digitale Dokumentation, sondern als zentraler Bezugspunkt für Daten, Dienste und Beziehungen innerhalb des Datenraums. Ergänzend wurden RDF-basierte Wissensmodelle und Linked-Data-Konzepte untersucht, um Informationen unterschiedlicher Herkunft miteinander zu verknüpfen und **in einen gemeinsamen semantischen Kontext zu überführen** (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; ZVEI / IDTA, 2026).

> **Warum Semantik entscheidend ist**
>
> Semantische Interoperabilität ermöglicht die organisationsübergreifende Interpretation von Informationen. Verwaltungsschalen bilden hierfür den zentralen Integrationsanker.

Die semantische Beschreibung industrieller Assets ist nicht nur von Bedeutung für Interoperabilität und Datenaustausch. Mit der Verbreitung datengetriebener Services und Industrial-AI-Anwendungen gewinnen standardisierte digitale Zwillinge als Wissens- und Kontextmodell an Bedeutung. Verwaltungsschalen schaffen damit die Grundlage für den automatisierten und intelligenten Einsatz von Daten. Semantische Interoperabilität wird damit zu einer wesentlichen Voraussetzung zukünftiger datengetriebener und KI-gestützter Wertschöpfungssysteme (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026b; ZVEI, 2025b).

5.4 Datensouveränität und föderierte Analysefähigkeit

Die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen stellt eine zentrale Voraussetzung datenraumgestützter Anwendungen dar. Gleichzeitig müssen Unternehmen jederzeit die Kontrolle über ihre Daten behalten. **Datensouveränität** bildet daher gemeinsam mit Zugriffskontrolle und Transparenz der Datennutzung eine wesentliche Voraussetzung für Akzeptanz und Skalierbarkeit industrieller Datenräume. Die Architektur adressiert diese Anforderungen durch ein föderiertes Datenraumkonzept. Informationen verbleiben grundsätzlich beim jeweiligen Eigentümer und werden ausschließlich kontrolliert für autorisierte Anwendungen bereitgestellt (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023; Plattform Industrie 4.0, 2026). Zur Umsetzung dieses Ansatzes werden digitale Identitäten, Datenraum-Connectoren und Zugriffskontrollmechanismen kombiniert. Die Authentifizierung erfolgt über einen Identity Provider, während Access Control Lists (ACL) die eigentliche Autorisierung steuern. Dateneigentümer können dadurch präzise festlegen, welche Informationen für welche Akteure zugänglich sind. Die Architektur ermöglicht damit nicht nur den Austausch von Informationen, sondern auch **verteilte Analysen**. Dienste können Informationen unterschiedlicher Teilnehmer nutzen, ohne dass sämtliche Daten an zentraler Stelle zusammengeführt werden müssen. Dieses Prinzip bildet einen wesentlichen Unterschied zu klassischen Cloud-Plattformen und stellt einen Kernbestandteil moderner Manufacturing-X-Architekturen dar.

5.5 Sicherheitsarchitektur des Datenraums

Die Realisierung von **Datensouveränität** erfordert ein Sicherheitsmodell, das organisationsübergreifende Zusammenarbeit ermöglicht, ohne die Kontrolle über Datenbestände aufzugeben. Im Projekt Antrieb 4.0 wurde hierzu ein mehrschichtiges Sicherheits- und Identitätskonzept entwickelt und im Demonstrator praktisch umgesetzt. Produktive Daten verbleiben grundsätzlich beim jeweiligen Eigentümer. In der Föderationsstelle des Datenraums werden ausschließlich Metadaten, semantische Beschreibungen sowie Referenzen auf Datenquellen und Dienste verwaltet. Sie fungiert als Vermittlungs- und Discovery-Ebene, ohne selbst zum Datenspeicher zu werden (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; Factory-X Consortium, 2024). Die organisationsübergreifende Authentifizierung erfolgt über einen Identity Provider, während Access Control Lists (ACL) die dezentrale Autorisierung übernehmen. Die Identität eines Akteurs wird zentral verifiziert, die Freigabe von Ressourcen verbleibt beim jeweiligen Datenhalter. Zur Absicherung der Kommunikation werden verschlüsselte Verbindungen, SSL-gesicherte Endpunkte sowie Proxy- und Maskierungsmechanismen eingesetzt. Dadurch bleiben lokale Datenbanken, Verwaltungsschalen und Edge-Dienste vor direkten Zugriffen aus dem Datenraum geschützt.

Ein weiterer Bestandteil des Sicherheitsmodells ist die **durchgängige Auditierbarkeit**. Zugriffe auf Datenraumressourcen werden protokolliert und können nachvollzogen werden. Dies unterstützt Compliance, Nachweisbarkeit und Informationssicherheit und schafft die Grundlage für vertrauenswürdige industrielle Datenökosysteme. Die praktische Umsetzung im Demonstrator zeigt, dass föderierte Datenhaltung, semantische Referenzierung, Identitätsmanagement und kontrollierte Zugriffskonzepte zu einer konsistenten Sicherheitsarchitektur kombiniert werden können. Damit liefert **Antrieb 4.0** den Nachweis der technischen Umsetzbarkeit souveräner und interoperabler Datenräume im industriellen Umfeld.

Datenraum Antrieb 4.0	Klassische Plattform
Daten verbleiben beim Eigentümer	Daten werden zentral gespeichert
Zugriff wird vom Dateninhaber kontrolliert	Zugriff wird vom Plattformbetreiber kontrolliert
Datenbereitstellung über Konnektoren und ACL	Direkte Datenbereitstellung
Föderiertes Identitäts- und Rechtemanagement	Zentrale Sicherheitsinstanz
Nachvollziehbarer und auditierbarer Zugriff	Eingeschränkte Transparenz

Tabelle 4: Datensouveränität im Vergleich

Warum Datenräume mehr sind als Plattformen – Konsequenzen für Datensouveränität und Zusammenarbeit.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht die grundlegenden Unterschiede zwischen **föderierten Datenraumarchitekturen** und klassischen Plattformmodellen. Während zentrale Plattformen auf die Übertragung von Datenhoheit an einen Plattformbetreiber angewiesen sind, ermöglichen **Datenräume** die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen bei gleichzeitigem Erhalt der Kontrolle durch die jeweiligen Datenhalter. Die im Reallabor Antrieb 4.0 umgesetzten Sicherheitsmechanismen zeigen, dass **Datensouveränität**, **Interoperabilität** und vertrauenswürdige Zusammenarbeit technisch miteinander vereinbar sind.

5.6 Daten und Services zusammenführen: Die Serviceplattform

Ein zentrales Ziel des Projekts bestand darin, Daten nicht isoliert bereitzustellen, sondern für **konkrete Mehrwertdienste** nutzbar zu machen. Hierzu wurde eine serviceorientierte Architektur verfolgt, in der Daten und Dienste als adressierbare Ressourcen betrachtet werden. Dienste nutzen Informationen aus Verwaltungsschalen, Betriebsdatenquellen und weiteren Datenraumressourcen und leiten daraus neue Informationen oder Funktionen ab. Die Serviceplattform ermöglicht die Beschreibung und Registrierung von Diensten, die Auffindbarkeit verfügbarer Services sowie die standardisierte Nutzung von Datenraumressourcen. Für die Referenz-Use-Cases bildet sie die Grundlage für Dienste wie Digital Asset Management, Design Verification und die energieeffiziente Auslegung. Gleichzeitig schafft sie die Voraussetzungen für zukünftige datenbasierte Geschäfts- und Servicemodelle.

5.7 Umsetzung im Demonstrator und praktische Validierung

Die entwickelte Architektur wurde im Projekt nicht nur konzeptionell beschrieben, sondern innerhalb eines **realen Demonstrators** umgesetzt und validiert. Hierzu wurden physische Antriebssysteme, Edge-Infrastrukturen, Verwaltungsschalen, Datenraum-Connectoren und digitale Dienste zu einer gemeinsamen Umgebung integriert. Die Architektur wurde dabei unter realitätsnahen Bedingungen erprobt und kontinuierlich erweitert. Die Validierung erfolgte anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Referenz-Use-Cases. Dadurch konnte untersucht werden, ob die Architektur die erforderlichen Informationsflüsse, Interoperabilitätsanforderungen und Servicefunktionen tatsächlich unterstützt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die gewählten Technologien zu einer **interoperablen Datenraumarchitektur** kombinieren lassen und die Grundlage für datenraumgestützte Mehrwertdienste schaffen.

> **Architektur als Enabler für Services**
>
> Der Mehrwert eines Datenraums entsteht durch interoperable Dienste auf Basis standardisierter Daten und Schnittstellen. Die Architektur von Antrieb 4.0 wurde deshalb konsequent serviceorientiert ausgelegt.

5.8 Erweiterungsperspektiven und Anschlussfähigkeit

Durch die Nutzung etablierter Standards wie OPC UA, Asset Administration Shells und föderierter Datenraumkonzepte besteht gleichzeitig eine hohe Anschlussfähigkeit an zukünftige Manufacturing-X- und Gaia-X-Initiativen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; Plattform Industrie 4.0, 2026; Factory-X Consortium, 2024). Die Architektur ist damit nicht auf die im Projekt betrachteten Demonstratoren beschränkt. Vielmehr stellt sie einen **übertragbaren Referenzansatz** für datenraumgestützte Anwendungen in der industriellen Antriebstechnik und darüber hinaus dar.

6. Implementierung und Validierung im Reallabor

Im Forschungsprojekt **„Reallabor Antrieb 4.0“** wurde eine föderierte Datenraumarchitektur nicht nur konzipiert, sondern als funktionsfähiger Demonstrator implementiert und unter realitätsnahen Bedingungen validiert. Ziel war der Nachweis der **technischen Machbarkeit eines herstellerübergreifenden Datenökosystems**, das eine sichere und interoperable Nutzung von Betriebs-, Engineering- und Servicedaten ermöglicht, ohne die Datensouveränität der beteiligten Akteure einzuschränken. Die im Projekt untersuchten Anwendungsfälle wurden bewusst nicht als isolierte Einzelanwendungen konzipiert. Vielmehr bilden sie unterschiedliche Phasen des Lebenszyklus eines Antriebssystems ab – von der Auslegung über Inbetriebnahme und Betrieb bis hin zu Verifikation, Optimierung und Service. Die Use Cases zeigen durchgängige Datenflüsse über den gesamten Lebenszyklus. Der Demonstrator verbindet **vertikale und horizontale Integration** zu einem durchgängigen Daten- und Informationsraum, in dem Daten unterschiedlicher Herkunft semantisch beschrieben, sicher ausgetauscht und für datengetriebene Mehrwertdienste genutzt werden können.

Die Umsetzung erfolgte schrittweise entlang der **Referenzarchitektur**. Beginnend bei der Datenerfassung am Antrieb wurden lokale Datenhaltung, semantische Beschreibung, föderierte Datenbereitstellung, sichere Zugriffskontrolle sowie Analyse- und Servicedienste integriert. Der Demonstrator diente als Referenzumgebung zur Validierung der entwickelten Datenraumtechnologien und der definierten Referenz-Use-Cases. Diese orientieren sich an den vier Phasen Engineering, Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung. Die Story-Lines dienten als strukturierender Rahmen zur Identifikation relevanter Datenflüsse, Akteure, Services und Mehrwerte. Die ausgewählten Szenarien zeigen exemplarisch, wie datenraumgestützte Services entlang des gesamten Produkt- und Anlagenlebenszyklus realisiert werden können.

6.1 Skalierbare Demonstratorarchitektur

Die gesamte **Datenraumarchitektur** wurde konsequent containerisiert umgesetzt. Sämtliche Kernkomponenten – einschließlich Edge-Systemen, Datenraumservern, Analytics-Diensten, Katalogdiensten und Nutzerverwaltung – werden als Docker-Container betrieben. Dieser Ansatz gewährleistet eine reproduzierbare Bereitstellung der Komponenten und ermöglicht gleichzeitig eine **flexible Skalierung** des Gesamtsystems. Insbesondere im Demonstratorbetrieb mit mehreren Projektpartnern erwies sich die Containerisierung als wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Integration und Wartung der Infrastruktur. Neue Dienste konnten unabhängig voneinander entwickelt, aktualisiert und ausgerollt werden, ohne bestehende Komponenten zu beeinflussen. Gleichzeitig entstand eine modulare Architektur, die sich problemlos um zusätzliche Datenquellen, Services oder Demonstratoren erweitern lässt.

Kernergebnis des Demonstrators

- Herstellerübergreifende Interoperabilität
- Föderierte Datenhaltung
- Semantische Interoperabilität durch AAS
- Kontrollierte Datenfreigabe
- Grundlage für datengetriebene Services

6.2 Homogene Edge-Architektur und Datenhaltung

Alle Edge-Systeme basieren auf einer **einheitlichen Architektur** mit standardisierten Diensten, Kommunikationsschnittstellen und Datenhaltungsmechanismen. Diese Vereinheitlichung reduziert Integrationsaufwände und erleichtert die Erweiterung der Demonstratorlandschaft um zusätzliche Systeme. Betriebsdaten werden in lokalen PostgreSQL-Datenbanken gespeichert und über standardisierte Schnittstellen – insbesondere OPC UA – erfasst. Die Edge-Systeme fungieren als primäre Datenhalter. Rohdaten verbleiben grundsätzlich beim jeweiligen Betreiber und werden nicht zentral repliziert. Instanz-Verwaltungsschalen repräsentieren die physischen Assets digital und ermöglichen deren eindeutige Identifikation im Datenraum. Die Kombination aus lokaler Datenhaltung und semantischer Beschreibung schafft die Grundlage für eine **föderierte und interoperable Datennutzung**.

6.3 Sichere Kommunikation und Adressierung

Für die Kommunikation zwischen Edge-Systemen, Datenraumservern und Cloud-Diensten wurde ein **einheitliches Adressierungskonzept** umgesetzt. Sämtliche Komponenten verfügen über eindeutige, über Webtechnologien auflösbare URIs und können organisationsübergreifend adressiert und referenziert werden. Die Kommunikation erfolgt ausschließlich über verschlüsselte HTTPS-Verbindungen. SSL-Zertifikate sichern alle Kommunikationsbeziehungen ab, während Reverse-Proxy-Komponenten Routing- und Sicherheitsfunktionen übernehmen. Standardisierte URI-Strukturen bilden die Grundlage für die Verknüpfung semantischer Informationen und die Nutzung von Linked-Data-Technologien. Gleichzeitig gewährleistet die Transportverschlüsselung einen **vertrauenswürdigen Betrieb des Datenraums**.

6.4 Föderierter Datenzugriff

Ein grundlegendes Prinzip der Architektur besteht darin, Daten **dezentral bei den jeweiligen Datenhaltern** zu belassen. Im Datenraum werden lediglich Metadaten, Beschreibungen und Referenzen auf die eigentlichen Datenquellen zentral vorgehalten. Dieses Konzept folgt dem Linked-Data-Ansatz und wahrt die Datensouveränität aller Beteiligten. Der Zugriff auf Daten erfolgt über Link-Following-Mechanismen. Dienste können über Referenzen im Datenkatalog auf freigegebene Datenquellen zugreifen, ohne dass eine zentrale Datensammlung erforderlich ist. Die tatsächliche Bereitstellung erfolgt erst nach erfolgreicher Authentifizierung und Autorisierung.

> **Architekturprinzip: Daten bleiben beim Eigentümer**
>
> - Betriebsdaten werden nicht zentral gespeichert & Rohdaten verbleiben auf Edge-Systemen
> - Im Datenraum werden nur Metadaten und Referenzen veröffentlicht
> - Zugriff erfolgt über Link-Following und definierte Freigaben
> - Datenhalter behalten jederzeit die Kontrolle über die Datennutzung

Die Zugriffskontrolle erfolgt sowohl auf Ebene des Datenraums als auch auf den Edge-Systemen. Hierfür kommen WebIDs (Authentifizierung) sowie Access Control Lists (ACL) (Autorisierung) zum Einsatz. Zusätzlich können unterschiedliche Berechtigungen für dynamische Datenquellen, Datenbanken oder Verwaltungsschalen vergeben werden. Diese **feingranulare Rechteverwaltung** ermöglicht eine flexible und gleichzeitig sichere Nutzung der bereitgestellten Informationen.

6.5 Nutzerverwaltung und Identitätsmanagement

Die **Identitäts- und Rechteverwaltung** wurde im Demonstrator über einen zentral betriebenen Identity Provider realisiert. Dieser übernimmt die Authentifizierung der beteiligten Nutzer und Dienste sowie die Verwaltung der Zugriffsrechte. Für die Demonstratorphase wurde die Komponente zentral durch Fraunhofer IIS betrieben; die Architektur unterstützt jedoch bereits föderierte Identitätsmodelle, bei denen Betreiberorganisationen oder Föderationsinstanzen die Identitäten verwalten. In produktiven Datenräumen können Identitäten durch Betreiberorganisationen oder unabhängige Föderationsinstanzen verwaltet werden. Die Validierung bestätigte die grundsätzliche Eignung dieses Ansatzes für föderierte Industrieökosysteme.

6.6 Verwaltungsschalen als semantisches Rückgrat

Eine zentrale Rolle innerhalb des Demonstrators übernehmen die **Asset Administration Shells (AAS)**. Sie bilden das semantische Rückgrat der Datenraumarchitektur und ermöglichen die standardisierte Beschreibung von Produkten, Komponenten, Anlagen und Diensten. Im Demonstrator wurden sowohl Typ- als auch Instanz-Verwaltungsschalen eingesetzt. Während Instanz-AAS konkrete Antriebssysteme beschreiben, stellen Typ-AAS standardisierte Produktinformationen der Hersteller bereit. Die Typ-Verwaltungsschalen wurden zentral bereitgestellt und über den Datenraum referenzierbar gemacht. Sie bilden die Grundlage für mehrere datengetriebene Dienste. Der Auslegungsservice nutzt Typ-AAS der Hersteller zur automatisierten Identifikation und zum Vergleich geeigneter Motor- und Umrichterkombinationen. Gleichzeitig können Betriebsdaten aus Instanz-AAS mit Engineering-Informationen verknüpft werden. Die Projektergebnisse bestätigen die **Verwaltungsschale als zentrales Interoperabilitätskonzept** zukünftiger industrieller Datenräume. Sie ermöglicht die Zusammenführung heterogener Informationen in einer gemeinsamen semantischen Struktur und schafft die Grundlage für automatisierte Dienste und digitale Wertschöpfungsketten.

6.7 Standardisierung als Grundlage der Interoperabilität

Die **Interoperabilität** der Demonstratorlandschaft basiert konsequent auf etablierten industriellen Standards. Hierzu gehören insbesondere OPC UA für die Kommunikation zwischen Feld- und Edge-Ebene, Asset Administration Shells für die semantische Beschreibung von Assets, ECLASS für die Klassifikation technischer Informationen sowie JSON, JSON-LD, RDF und das Linked Data Protocol (LDP) für Datenrepräsentation und Datenraumkommunikation. Durch diese Standardisierung konnten Daten unterschiedlicher Hersteller in einer gemeinsamen Struktur beschrieben und verarbeitet werden. Gleichzeitig wurde die Grundlage geschaffen, um zukünftige Erweiterungen der Architektur ohne grundlegende Anpassungen zu integrieren.

Schlüsselstandards des Demonstrators

- OPC UA – Kommunikation zwischen Feld- und Edge-Ebene
- AAS – Semantische Beschreibung von Assets
- ECLASS – Standardisierte Merkmals- und Produktklassifikation
- JSON-LD / RDF – Semantische Datenrepräsentation
- LDP – Datenraumkommunikation
- WebID / ACL – Identitäts- und Zugriffsmanagement

6.8 Monitoring, Betrieb und Skalierbarkeit

Für den Betrieb des Demonstrators wurde ein **Monitoring-System** implementiert. Dieses überwacht sowohl die Docker-Container als auch die Kommunikationsbeziehungen zwischen den einzelnen Komponenten. Zusätzlich werden Zugriffsrechte, Systemzustände und Datenraumdienste kontinuierlich überwacht. Die Monitoring-Infrastruktur unterstützt die frühzeitige Erkennung von Fehlerzuständen sowie die Analyse von Leistungs- und Kommunikationsproblemen. Dadurch konnten im Projektverlauf zahlreiche Optimierungen vorgenommen und die Stabilität des Gesamtsystems kontinuierlich verbessert werden. Der mehrjährige Demonstratorbetrieb bestätigte die **Skalierbarkeit und Stabilität** der entwickelten Architektur auch bei wachsender Anzahl von Diensten, Datenquellen und Teilnehmern.

6.9 Architektur im Praxistest

Das **Reallabor Antrieb 4.0** validierte erfolgreich eine durchgängige Datenraumarchitektur für industrielle Antriebssysteme. Herstellerübergreifende Interoperabilität, semantische Integration und föderierte Datenhaltung konnten unter realen Bedingungen nachgewiesen werden. Der Demonstrator stellt damit einen **wesentlichen Machbarkeitsnachweis** für zukünftige Manufacturing-X-konforme Datenräume dar.

Die Validierung des Demonstrators zeigt

- Föderierte Datenräume sind heute umsetzbar
- AAS schafft semantische Interoperabilität
- Datensouveränität und Datennutzung sind vereinbar
- Standards ermöglichen Herstellerinteroperabilität
- Datenräume schaffen die Basis für digitale Services

Darüber hinaus bildet die validierte Infrastruktur die technische Grundlage für die im folgenden Kapitel beschriebenen datengetriebenen Services. Erst durch die erfolgreiche Umsetzung der Datenraumarchitektur wurde es möglich, **Monitoring-, Analyse- und Engineeringdienste** herstellerübergreifend bereitzustellen und entlang des gesamten Lebenszyklus von Antriebssystemen nutzbar zu machen.

Vom Demonstrator zum Service durch die Kombination von:

- Verwaltungsschalen
- Föderiertem Datenraum
- Edge-Infrastruktur
- Sicherem Identitätsmanagement
- Standardisierten Schnittstellen

Stimme aus dem Projekt

„Der große Mehrwert liegt dabei in den gemeinsamen Standards und im multilateralen Datenraum.

Sie ermöglichen einen herstellerunabhängigen Zugriff auf Daten, die wiederum als Grundlage für smarte Services dienen.“



Dr.-Ing. Martin Schellenberger ist Gruppenleiter Data Analytics am Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB. Im Projekt Antrieb 4.0 verantwortet er die Realisierung und Demonstration der Serviceplattform sowie der darauf aufbauenden datengetriebenen Dienste. Im Gespräch erläutert er, wie gemeinsame Standards und Datenräume die Grundlage für herstellerübergreifende Services und zukünftige Industrial-AI-Anwendungen bilden.

Dr. Martin Schellenberger,

Fraunhofer IISB · Gruppenleiter Data Analytics

Herr Schellenberger, Sie verantworten im Projekt Antrieb 4.0 die Services und die Serviceplattform. Wo steht das Projekt aktuell und worauf liegt derzeit Ihr Fokus?

[…] Die Basis dafür ist unsere Antrieb-4.0-Systemarchitektur. Wir haben zunächst die Serviceplattform und die Infrastruktur aufgebaut, mit der sich Daten aus Antrieben unterschiedlicher Hersteller verwalten und bereitstellen lassen. Entscheidend war dabei die Interoperabilität: Alle integrierten Antriebe sprechen dieselbe Sprache. Das erreichen wir durch konsequente Nutzung gemeinsamer Standards, insbesondere über Verwaltungsschalen. Ergänzt wird das Ganze durch unseren geteilten Antrieb-4.0-Datenraum. Dort kann ich, immer unter Wahrung von Zugriffsrechten, auf relevante Daten zugreifen, ohne eigene Datensilos aufbauen zu müssen.

Gerade bei Services ist die Nutzerperspektive entscheidend. Wie haben Sie sichergestellt, dass die tatsächlichen Bedarfe der Industrie berücksichtigt werden?

Das war für uns ein zentraler Punkt. Wir haben bewusst keinen fertigen Anwendungsfall-Katalog aus dem Projektantrag abgearbeitet. Stattdessen sind wir ergebnisoffen gestartet. Die beiden priorisierten Anwendungsfälle wurden erst im Laufe des Projekts in einem mehrstufigen Auswahlprozess definiert. […] Den Abschluss bildete eine Online-Umfrage unter namhaften Antriebsherstellern, Maschinen- und Anlagenbauern sowie Anlagenbetreibern. Das Ergebnis war eindeutig und die beiden genannten Anwendungsfälle waren gefunden.

Im Projekt werden auch smarte Basisservices erforscht, die im Datenraum bereitgestellt werden. Welche technischen Komponenten sind dafür besonders relevant?

Die technischen Komponenten sind der eigentliche Innovationstreiber im Projekt. Nehmen wir den Anwendungsfall „Ganzheitliche energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen“: Energieeffizienz einzelner Antriebe ist kein neues Thema.

Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass wir erstmals herstellerübergreifend alle Antriebssysteme einer Anlage in den Blick nehmen können. Über unsere Systemarchitektur erhalten wir unabhängig vom Hersteller eine Gesamtsicht auf sämtliche verbauten Antriebe. Anstatt Informationen mühsam aus verschiedenen Quellen zusammenzusuchen, lassen sich über den Antrieb-4.0-Datenraum und eine entsprechende Authentifizierung reale Leistungsdaten und kumulierte Energieverbräuche in definierten Zeitfenstern abrufen. Das spart Zeit, senkt Kosten und erhöht die Transparenz.

Darüber hinaus können Energieverbräuche bereits für eine geplante Konfiguration prognostiziert und später während der Inbetriebnahme verifiziert werden. Das erleichtert eine effiziente Auslegung und Nutzung der Anlage und wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Systeme aus. Besonders spannend ist auch der Austausch der erfassten Ist-Daten zwischen Betreibern, Maschinenbauern und Anlagenherstellern. Daraus lassen sich Optimierungspotenziale ableiten, etwa im Fahrprofil einer Anlage.

Der große Mehrwert liegt dabei in den gemeinsamen Standards und im multilateralen Datenraum. Sie ermöglichen einen herstellerunabhängigen Zugriff auf Daten, die wiederum als Grundlage für smarte Services dienen. Wer künftig eigene Services entwickeln möchte, kann sich an unserer Architektur orientieren und Software nur einmal für alle Nutzer entwickeln – unabhängig vom eingesetzten Antrieb.

Das Interview wurde von Ute Fertig geführt und in seiner vollständigen Fassung am 30. Januar 2026 veröffentlicht auf www.antrieb40.de.

7. Datengetriebene Services im Einsatz und ihr Mehrwert

Die Implementierung im Projekt **Antrieb 4.0** orientiert sich konsequent an den beiden priorisierten Schlüssel-Use-Cases „Digitalisiertes Asset Management“ und „Ganzheitliche energieeffiziente Auslegung von Antriebslösungen“. Für den Betriebsschwerpunkt des Asset Managements wurden als modulare Dienste das Energiemonitoring, das Überlast-Monitoring und die Wirkungsgradüberwachung realisiert. Für den Engineering-Schwerpunkt der Auslegung wurden zwei komplementäre Cloud-Services umgesetzt: ein herstellerübergreifender Design-/Sizing-Service und ein Verifikationsservice, der Auslegungsannahmen mit realen Betriebsmessdaten abgleicht. Sämtliche Dienste sind entlang der mehrstufigen Systemarchitektur (Feld – Edge – Cloud – Datenraum) entkoppelt, nutzen Verwaltungsschalen (AAS) als semantisches Rückgrat und sind über den föderierten Datenraum interoperabel auffind-, aufruf- und kombinierbar.

7.1 Services in der Referenzarchitektur

Die Services wurden im Projekt nicht als isolierte Softwarekomponenten entwickelt, sondern als konkrete Umsetzung der priorisierten Anwendungsfälle entlang des gesamten Lebenszyklus eines Antriebssystems. Ihre technische Realisierbarkeit wurde schrittweise in den Demonstratoren validiert und in unterschiedlichen Anwendungsszenarien untersucht. Dadurch konnte gezeigt werden, dass standardisierte Verwaltungsschalen, föderierte Datenraumtechnologien sowie Edge- und Cloud-Analytics gemeinsam die Grundlage für **interoperable datengetriebene Mehrwertdienste** bilden. Die entwickelten Services fungieren damit nicht nur als funktionale Bausteine der Systemarchitektur, sondern zugleich als **Nachweis der technischen Machbarkeit** eines herstellerübergreifenden Serviceökosystems für industrielle Antriebssysteme.

Fünf Analytics-Services wurden im Demonstrator validiert

- Energiemonitoring
- Überlastmonitoring
- Wirkungsgradüberwachung
- Design/Sizing Service
- Design Verification

7.2 Digitalisiertes Asset Management

Das **digitalisierte Asset Management** ist der Integrationsrahmen für Monitoring- und Analysefunktionen im laufenden Betrieb elektrischer Antriebssysteme. Es verbindet die rohdatennahe Erfassung am Edge mit standardisierten, containerisierten Cloud-Analytics und macht Ergebnisse nutzer- und rollenbasiert über Web-Oberflächen zugänglich. Damit werden Interoperabilität, Skalierbarkeit und Datenhoheit gleichermaßen adressiert, ohne an herstellerspezifische Edge-Schemata zu binden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde das Asset Management als erster Implementierungsschwerpunkt gewählt, da sich hier die gesamte Datenkette von der Datenerfassung bis zur Analyse exemplarisch abbilden ließ. Die entwickelten Dienste dienten zugleich als **Referenzimplementierungen** für die Validierung der Datenraum- und Servicearchitektur.

Nutzen für Betreiber

- Transparenz über Energieverbrauch
- Früherkennung kritischer Betriebszustände
- Kontinuierliche Effizienzbewertung
- Datenbasis für Optimierungen
- Unterstützung zustandsorientierter Wartung



7.2.1 Aufbau der Edge-Datenbank

Für jedes angebundene Antriebssystem wird auf der Edge eine lokale, containerisierte Datenbank (PostgreSQL) betrieben, die zeitlich hochaufgelöste Rohdaten (z. B. Ströme, Spannungen, Drehzahl, Drehmoment) aus dem Feld aufnimmt. Die Einspeisung erfolgt über standardisierte Schnittstellen, insbesondere OPC UA. Die Edge-Datenbank dient als Rohdatenpuffer und Quelle für latenzkritische Zugriffe. Berechnungen und Aggregationen sind von herstellerspezifischen Edge-Strukturen entkoppelt und werden standardisiert in der Cloud ausgeführt, nachdem autorisierte Analytics-Dienste die benötigten Daten und Metadaten aus dem föderierten Datenraum bezogen haben. Visualisierungen werden über Web-Oberflächen und Dashboards bereitgestellt. Die Rohdaten verbleiben vollständig beim Betreiber, während analytische Funktionen herstellerübergreifend nutzbar sind. Die Architektur wurde in den Demonstratoren erfolgreich validiert. Dabei zeigte sich, dass Antriebsdaten unterschiedlicher Hersteller interoperabel erfasst, gespeichert und für nachgelagerte Dienste bereitgestellt werden können, **ohne die Hoheit über die Rohdaten aufzugeben**. Damit wurde die **praktische Umsetzbarkeit föderierter Datenraumkonzepte** im industriellen Umfeld nachgewiesen.

7.2.2 Beschreibung des Programmablaufs entlang der Systemarchitektur

Auf der Feldebene erfassen Antriebe Messwerte und publizieren sie an die Edge. Edge-Services plausibilisieren Zeitstempel und Synchronität, speichern die Rohdaten und stellen im Rahmen erteilter Freigaben referenzierte Datenpunkte und Metadaten über Solid Pods im Datenraum bereit. Cloud-Analytics identifizieren über Daten- und Servicekataloge relevante Quellen, fordern autorisiert Daten an, führen weiterführende Berechnungen (z. B. Energie, Effizienz, Grenzwertüberschreitungen) durch und veröffentlichen die Ergebnisse wiederum als Dienste im Katalog. Ergebnisse und Visualisierungen werden nutzer- und rollenbasiert über Web-Oberflächen bereitgestellt. Soweit sinnvoll, werden verdichtete Kennzahlen in Instanz-AAS zurückgeschrieben und in Asset-, Wartungs- oder Berichtskontexte integriert. Die klare Trennung von **Datenerfassung, Datenhaltung und Datenauswertung**

reduziert Kopplungen, erhöht die Austauschbarkeit und ermöglicht föderierte Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg. Zudem steigert sie die **Wiederverwendbarkeit und Interoperabilität** der Analytics-Dienste.

7.2.3 Grundlegender Aufbau der Cloud-Analytics

Die **Cloud-Analytics** wurden als reproduzierbare, skalierbare Container-Architektur umgesetzt. Pro Analysefunktion (z. B. Energie-, Überlast- oder Wirkungsgradmonitoring) läuft ein eigenständiger Service-Container mit klaren Ein-/Ausgabeschnittstellen und Datenraum-Konnektivität. Ein Reverse Proxy (z. B. Traefik) terminiert Zugriffe, steuert Routing und stellt die Transportverschlüsselung sicher. Eine Cloud-Datenbank (PostgreSQL) nimmt aggregierte und abgeleitete Daten sowie Serviceartefakte auf; eine Visualisierungsschicht (Grafana) generiert Dashboards dynamisch auf Basis von Katalogeinträgen. Ehemals Edge-gebundene Trigger/Funktionen wurden in standardisierte Cloud-Container verlagert, wodurch die Datenraumkompatibilität erhöht und Abhängigkeiten von heterogenen Edge-Schemata reduziert werden. Jede Funktion lässt sich unabhängig entwickeln, versionieren, austauschen und horizontal skalieren. Die Containerisierung der Analytics-Funktionen erwies sich dabei als **wesentliche Voraussetzung für Skalierbarkeit und Übertragbarkeit** der entwickelten Dienste. Neue Services konnten unabhängig von bestehenden Komponenten integriert werden, wodurch die Architektur schrittweise zu einer modularen Analytics-Plattform ausgebaut wurde.

7.2.4 Monitoring-Services

Das **Energiemonitoring** berechnet kontinuierlich elektrische und mechanische Leistung sowie Energieverbräuche. Die Berechnungen folgen IEEE 1459-2010; Kennzahlen werden als Zeitreihen und Reports bereitgestellt und – etwa nach Referenzfahrten – optional als konsolidierte Indikatoren in AAS zurückgeschrieben. Das Energiemonitoring stellte den ersten vollständig realisierten Analytics-Dienst der Plattform dar und diente als Referenzanwendung für die Validierung der gesamten Architektur. Die Demonstratoren zeigten, dass Energieverbräuche automatisiert erfasst, ausgewertet und über den Datenraum bereitgestellt werden können. Gleichzeitig entstand damit die Datengrundlage für weiterführende Dienste wie die Wirkungsgradanalyse sowie die Verifikation von Auslegungsentscheidungen. Das Überlast-Monitoring identifiziert Betriebszustände oberhalb definierter Grenzwerte. Zunächst wurden diese Grenzwerte aus Nennparametern abgeleitet, perspektivisch werden zulässige Lastgrenzen automatisiert aus Instanz-AAS gelesen. Überschreitungen werden visuell hervorgehoben und als Ereignisse bereitgestellt. Die Wirkungsgradüberwachung setzt elektrische und mechanische Leistungsgrößen in Beziehung und bewertet die Effizienz kontinuierlich; Abweichungen vom erwarteten Wirkungsgradband weisen auf veränderte Betriebsbedingungen, Verschleiß oder Optimierungspotenziale hin.

Die Kombination aus Energie-, Überlast- und Wirkungsgradmonitoring ermöglicht erstmals eine **ganzheitliche Betrachtung des Anlagenbetriebs**. Während das Energiemonitoring Transparenz über den Energiebedarf schafft, identifiziert das Überlastmonitoring kritische Betriebszustände und die Wirkungsgradüberwachung bewertet kontinuierlich die energetische Qualität des Betriebs. Gemeinsam bilden diese Dienste die Grundlage für **datenbasierte Optimierungs- und Wartungsstrategien**. Das Asset Management schafft eine herstellerübergreifende Betriebsbasis für Transparenz, Zustandsbewertung und datengetriebene Optimierung.

7.3 Energieeffiziente Antriebsauslegung

Die **energieeffiziente Antriebsauslegung** adressiert die Komplexität industrieller Anwendungen, in denen neben technischen und wirtschaftlichen auch ökologische Kriterien wie Energieverbrauch und CO_2-Emissionen zu berücksichtigen sind. Sie verbindet Engineering-Entscheidungen mit realen Betriebsdaten und schafft so eine durchgängige Brücke zwischen Planung, Inbetriebnahme und Betrieb.

Zur Einordnung in die Systemarchitektur: Der Auslegungsservice ist als Cloud-Dienst implementiert, der herstellerübergreifend auf Typ-Verwaltungsschalen zugreift, geeignete Komponenten bestimmt und Ergebnisse standardisiert im IDTA-Submodell „Sizing of Power Drive Trains“ ablegt. Der Verifikationsservice konsumiert anschließend autorisiert Edge-Zeitreihen aus dem Datenraum, bildet daraus das effektive Betriebsprofil, vergleicht Soll-/Ist-Energie- und CO_2-Werte und liefert Verlustanalysen sowie Handlungsempfehlungen. Beide Dienste sind über Identität (WebID), Zugriffsrechte (ACL) und Katalog (Service-/Datenkatalog) in den föderierten Datenraum integriert und nutzen die **AAS als semantisches Rückgrat** für Referenzierbarkeit und Wiederverwendung.

Nutzen für Maschinen- und Anlagenbauer

- Herstellerübergreifende Komponentenwahl
- Vergleich von Energie- und CO_2-Werten
- Reduzierter Engineering-Aufwand
- Wiederverwendbare Auslegungsergebnisse
- Kontinuierliche Rückkopplung aus dem Betrieb



7.3.1 Service für energieeffiziente Auslegung (Design/Sizing)

Die energieeffiziente Auslegung industrieller Antriebssysteme beeinflusst Investitions-, Betriebs- und Energiekosten sowie CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Gleichzeitig müssen unterschiedliche Herstellerlösungen hinsichtlich ihrer Effizienz objektiv vergleichbar sein. Der entwickelte Auslegungsservice nutzt standardisierte Verwaltungsschalen und semantisch beschriebene Produktinformationen, um **herstellerübergreifend die energieeffizienteste Motor-/Umrichter-Kombination** zu identifizieren und die Ergebnisse für nachgelagerte Prozesse bereitzustellen.

Technischer Ablauf

Zunächst definiert der Nutzer Anwendung, Randbedingungen sowie Last- und Bewegungsprofile. Anschließend liest der Dienst Typ-Verwaltungsschalen der Hersteller aus, identifiziert geeignete Motor-/Umrichter-Kombinationen und prüft die Mindestleistungsanforderungen. Energieverbrauch und CO_2-Äquivalente werden gemäß den CEMEP-Leitlinien berechnet und vergleichend dargestellt. Die ausgewählte Konfiguration wird einschließlich der Ergebnisse im IDTA-Submodell „Sizing of Power Drive Trains“ abgelegt und für Verifikation, Inbetriebnahme und Beschaffung semantisch verfügbar gemacht.

Ergebnisse und Nutzen

Die Validierung zeigte, dass sich **herstellerübergreifende Produktinformationen** über standardisierte Verwaltungsschalen automatisiert verarbeiten lassen. Dadurch werden Energieverbrauch, Betriebskosten und CO_2-Auswirkungen verschiedener Lösungen vergleichbar.

7.3.2 Service zur Auslegungsverifikation (Design Verification)

Die tatsächliche Effizienz eines Antriebssystems zeigt sich häufig erst im Betrieb. Abweichungen zwischen Auslegung und Nutzung können Energie- und CO_2-Einsparungen mindern oder Optimierungspotenziale verdecken. Der Verifikationsservice vergleicht reale Betriebsdaten mit den ursprünglichen Auslegungsannahmen und leitet daraus Erkenntnisse für Optimierung, Re-Engineering und zukünftige Auslegungen ab. Damit schließt er den Regelkreis zwischen Engineering und Betrieb.

Technischer Ablauf

Der Service greift autorisiert auf Edge-Zeitreihen zu, ermittelt daraus das Betriebsprofil und vergleicht dieses mit den ursprünglichen Auslegungsannahmen. Liegt ein Sizing-Submodell vor, erfolgt der direkte Soll-/Ist-Abgleich; andernfalls werden Soll-Werte auf Basis der Anwendungsparameter berechnet. Anschließend erstellt der Dienst Verlustanalysen, visualisiert Betriebspunkte und leitet Handlungsempfehlungen ab. Freigegebene Ergebnisse werden in die Instanz-Verwaltungsschale zurückgeschrieben und stehen Asset-Management- sowie Instandhaltungsprozessen zur Verfügung.

Ergebnisse und Nutzen

Der Verifikationsservice verknüpft Auslegungsannahmen mit realen Betriebsdaten und unterstützt die kontinuierliche Optimierung von Energieeffizienz und Betrieb. Er macht Effizienzpotenziale messbar, identifiziert Ursachen für Abweichungen und liefert belastbare Entscheidungsgrundlagen. Unternehmen erhalten damit ein kontinuierliches Feedbacksystem zur Verbesserung von Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit und zukünftigen Auslegungen. Gleichzeitig wird sichtbar, wie Verwaltungsschalen, Betriebsdaten und datenraumgestützte Dienste zu einem durchgängigen digitalen Optimierungskreislauf verbunden werden können.

7.3.3 Interoperable Services im Datenraum: Eine kurze Zusammenfassung

Die entwickelten Services demonstrieren, wie sich **datengetriebene Mehrwertdienste** entlang des gesamten Lebenszyklus industrieller Antriebssysteme umsetzen lassen. Monitoring-, Auslegungs- und Verifikationsdienste verbinden Engineering und Betrieb in einer gemeinsamen Datenraumarchitektur. Die Validierung in den Demonstratoren bestätigt, dass Verwaltungsschalen, Datenräume und Cloud-Services gemeinsam die Grundlage für eine serviceorientierte und herstellerübergreifende Wertschöpfung bilden. Die Kombination aus Edge-Infrastruktur, Cloud-Analytics, Verwaltungsschalen und Datenraumtechnologien stellt damit eine **übertragbare Referenzarchitektur** für zukünftige digitale Serviceökosysteme im Umfeld industrieller Antriebe dar.

8. Ergebnisse der Machbarkeitsstudie – was wirklich funktioniert

Die Umsetzung des **Reallabors Antrieb 4.0** verfolgte das Ziel, die praktische Machbarkeit eines interoperablen Datenraums für industrielle Antriebssysteme nachzuweisen. Über die Projektlaufzeit wurden hierzu Datenraumtechnologien, Verwaltungsschalen, Edge- und Cloud-Infrastrukturen sowie datengetriebene Dienste entwickelt und in einer herstellerübergreifenden Demonstratorumgebung validiert. Die Projektergebnisse zeigen, dass die technologischen Grundlagen für interoperable Datenräume verfügbar sind. Der wirtschaftliche Nutzen entsteht jedoch erst durch die **Verbindung von Daten, digitalen Diensten und organisationsübergreifender Zusammenarbeit**. Diese Entwicklung wird aktuell auch im Umfeld von Manufacturing-X, Factory-X sowie der Plattform Industrie 4.0 adressiert, wo Daten zunehmend als eigenständiger Produktionsfaktor betrachtet werden (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a; Plattform Industrie 4.0, 2026c). Die nachfolgend dargestellten Erkenntnisse fassen die wichtigsten Erfahrungen aus dem Projekt zusammen. Sie adressieren zentrale Fragestellungen zukünftiger Datenökosysteme: Wie lässt sich Interoperabilität zwischen Unternehmen herstellen? Wie können Datensouveränität und Datennutzung miteinander vereinbart werden? Welche Rolle spielen Verwaltungsschalen, digitale Dienste und Governance-Strukturen für die Skalierung datengetriebener Wertschöpfung? Die **Erfahrungen aus Antrieb 4.0** liefern hierzu konkrete praktische Erkenntnisse und sollen Unternehmen sowie zukünftigen Projekten als Orientierung dienen.

Schlüsselerkenntnis	Nutzen in der Praxis
Interoperabilität erfordert Semantik und Standards	Ohne einheitliche Bedeutungsebene bleiben Schnittstellen wirkungslos
Verwaltungsschalen entfalten Nutzen erst durch aktive Integration	Reine Bereitstellung reicht nicht – Prozesse und Dienste müssen angebunden werden
Datensouveränität und Datennutzung sind gleichzeitig möglich	Technische Mechanismen erlauben kontrollierte Freigabe ohne Kontrollverlust
Edge und Cloud ergänzen sich	Skalierbarkeit und Wiederverwendung von Analysefunktionen werden erst durch Kombination möglich
Integration ist aufwendiger als Analyse	Datenmodellierung und -harmonisierung binden mehr Ressourcen als die eigentliche Auswertung
Verknüpfung von Engineering und Betrieb eröffnet Optimierungspotenziale	Rückführung von Betriebsdaten in die Entwicklung verbessert künftige Produktgenerationen
Datenräume sind auch organisatorische Projekte	Governance, Rollen und Verantwortlichkeiten sind ebenso wichtig wie Technik
Wirtschaftlicher Nutzen entsteht durch wiederverwendbare Services	Nicht die Datenbereitstellung allein, sondern skalierbare Dienste schaffen Wertschöpfung

Tabelle 5: Zentrale Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie

8.1 Interoperabilität entsteht nicht durch Standards allein

Die Nutzung etablierter Standards wie OPC UA, Asset Administration Shells oder ECLASS erleichterte die technische Integration unterschiedlicher Systeme erheblich. Die eigentliche Herausforderung lag jedoch weniger in der Kommunikation als in der semantischen Harmonisierung der Informationen. Unterschiedliche Hersteller beschreiben vergleichbare Sachverhalte häufig in unterschiedlichen Strukturen oder Detaillierungsgraden. Die Projektergebnisse zeigen daher, dass **Interoperabilität nicht allein durch technische Standards entsteht**. Ebenso wichtig sind gemeinsame Informationsmodelle und eine abgestimmte semantische Beschreibung der Daten. Standardisierung muss technische und semantische Aspekte gleichermaßen berücksichtigen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; Factory-X Consortium, 2024).

8.2 Verwaltungsschalen schaffen Mehrwert durch Anwendungen

Verwaltungsschalen schaffen **Mehrwert erst im Zusammenspiel mit konkreten Anwendungen**. Besonders im Rahmen des Design-/Sizing-Services zeigte sich, dass standardisierte Produktinformationen automatisiert ausgewertet und herstellerübergreifend genutzt werden können (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2019; Plattform Industrie 4.0, 2022a; ZVEI / IDTA, 2026). Verwaltungsschalen schaffen den größten Nutzen, wenn sie konsequent für konkrete Anwendungen, Dienste und Prozesse ausgelegt werden.

8.3 Datensouveränität und Datennutzung lassen sich vereinbaren

Ein zentrales Ergebnis des Demonstrators besteht im Nachweis, dass datengetriebene Dienste nicht zwangsläufig eine zentrale Datensammlung voraussetzen. Im Projekt verblieben die Betriebsdaten auf den jeweiligen Edge-Systemen, während über den Datenraum lediglich Metadaten und Zugriffsreferenzen bereitgestellt wurden. Die erfolgreiche Umsetzung von Monitoring-, Analyse- und Verifikationsdiensten zeigt, dass **Datensouveränität und Datennutzung keine Gegensätze darstellen**. Datenhoheit sollte als zentrales Architekturprinzip datenraumbasierter Lösungen verstanden werden (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023; Plattform Industrie 4.0, 2026).

8.4 Daten lokal halten, Analytics als Service bereitstellen

Die Entwicklung der Edge- und Cloud-Analytics zeigte, dass sich eine klare Trennung zwischen Datenhaltung und Analyse bewährt. Während die lokale Speicherung hochaufgelöster Betriebsdaten Vorteile hinsichtlich Datensouveränität und Verfügbarkeit bietet, erwies sich die Bereitstellung analytischer Funktionen als Cloud-Service als deutlich flexibler und besser skalierbar. Die Erfahrungen sprechen dafür, **Daten möglichst nah an ihrer Quelle zu belassen und Analysefunktionen als standardisierte Dienste bereitzustellen** – ob als Cloud-Service oder transferierbare Algorithmen nach dem Compute-to-Data-Prinzip. Die Trennung von Datenhaltung und Analyse erhöht Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit.

8.5 Integration ist die eigentliche Herausforderung

Der größte Integrationsaufwand entstand nicht bei Technologien oder Analysealgorithmen, sondern bei der Harmonisierung von Datenmodellen und organisationsübergreifenden Informationsstrukturen. Die Projektergebnisse bestätigen, dass **semantische und organisatorische Integration** häufig aufwendiger ist als die technische Umsetzung. Der Aufwand liegt in der fachlichen Beschreibung,

Harmonisierung und organisatorischen Abstimmung der zugrunde liegenden Informationen. Insofern hängt der langfristige Erfolg datengetriebener Anwendungen weniger von einzelnen Technologien als von der Qualität gemeinsamer Informationsmodelle und deren organisationsübergreifender Nutzung ab (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2025; Plattform Industrie 4.0, 2026a).

8.6 Die Verbindung von Engineering und Betrieb schafft Mehrwert

Die Verknüpfung von Auslegungsdaten und realen Betriebsdaten ermöglicht eine **kontinuierliche Optimierung** von Energieeffizienz, Betrieb und zukünftigen Engineering-Entscheidungen. Durch die Kombination von Design-/Sizing-Service und Verifikationsservice konnten Auslegungsannahmen erstmals systematisch mit realen Betriebsdaten abgeglichen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass gerade diese Rückkopplung zwischen Planung und Betrieb neue Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung eröffnet. Die Erfahrungen sprechen dafür, zukünftige digitale Dienste konsequent entlang des gesamten Lebenszyklus von Produkten und Anlagen zu entwickeln (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a).

8.7 Erfolgreiche Datenräume sind Organisationsprojekte

Der Aufbau von Datenräumen erfordert neben Technologie insbesondere **Governance, Verantwortlichkeiten und organisationsübergreifende Zusammenarbeit**. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 verdeutlichen damit, dass die Einführung datenraumbasierter Ökosysteme nicht allein als Digitalisierungs- oder IT-Projekt verstanden werden sollte. Vielmehr handelt es sich um einen organisatorischen Transformationsprozess, bei dem technische, wirtschaftliche und kooperative Fragestellungen gleichermaßen berücksichtigt werden müssen.

> **Datenräume sind Organisationsprojekte**
>
> Technische Interoperabilität bildet die Grundlage. Langfristige Skalierung entsteht jedoch erst durch gemeinsame Governance, klare Verantwortlichkeiten und Vertrauen zwischen den beteiligten Akteuren.

8.8 Services schaffen wirtschaftlichen Nutzen

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass die eigentliche wirtschaftliche Wirkung von Datenräumen weniger in der Bereitstellung von Daten als vielmehr in der **Bereitstellung wiederverwendbarer Dienste** liegt. Während die technische Integration einzelner Datenquellen zunächst einen notwendigen Aufwand darstellt, entstehen die langfristigen Mehrwerte durch Services, die auf einer gemeinsamen Daten- und Interoperabilitätsbasis aufbauen und über unterschiedliche Anlagen, Standorte und Organisationen hinweg genutzt werden können. Besonders die im Projekt realisierten Monitoring-, Analyse-, Auslegungs- und Verifikationsdienste verdeutlichen dieses Potenzial. Durch die Nutzung standardisierter Schnittstellen, Verwaltungsschalen und Datenraummechanismen konnten die Dienste unabhängig von einzelnen Herstellern entwickelt und auf unterschiedliche Antriebssysteme angewendet werden. Die Erfahrungen aus dem Demonstratorbetrieb zeigen damit, dass sich datengetriebene Mehrwertdienste grundsätzlich entkoppelt von den zugrunde liegenden Anlagen skalieren lassen. Aus wirtschaftlicher Sicht eröffnet dieser Ansatz neue Möglichkeiten für servicebasierte Geschäftsmodelle. Anstelle individueller Integrationslösungen für einzelne Kunden können standardisierte Dienste entwickelt und über eine gemeinsame Datenrauminfrastruktur einer Vielzahl von Nutzern bereitgestellt werden. Gleichzeitig profitieren Betreiber von einer verbesserten Transparenz hinsichtlich

Energieverbrauch, Anlagenzustand und Optimierungspotenzialen, ohne eigene Analyseinfrastrukturen aufbauen zu müssen.

Wirtschaftlicher Nutzen entsteht durch Services

Datenräume schaffen die Grundlage. Wertschöpfung entsteht jedoch erst durch wiederverwendbare Monitoring-, Analyse-, Engineering- und Optimierungsdienste.

Die Projektergebnisse legen nahe, dass die langfristige wirtschaftliche Attraktivität industrieller Datenräume vor allem dort entsteht, wo **technische Interoperabilität mit skalierbaren digitalen Services** kombiniert wird. Datenräume werden damit nicht nur zu einer Infrastruktur für den Datenaustausch, sondern zu einer Plattform für neue Formen der Wertschöpfung, Zusammenarbeit und kontinuierlichen Optimierung über Unternehmensgrenzen hinweg. Die Erfahrungen aus dem Reallabor zeigen, dass die langfristige Wirtschaftlichkeit datenraumgestützter Lösungen nicht aus einzelnen Technologien entsteht, sondern aus bewusst gewählten Architektur- und Umsetzungsentscheidungen. Die dargestellten Maßnahmen haben sich in der praktischen Umsetzung bewährt und verdeutlichen, wie Interoperabilität, Skalierbarkeit und Datensouveränität gemeinsam die Grundlage für wiederverwendbare digitale Services und neue Formen der Wertschöpfung schaffen können.

Architekturentscheidungen	Nutzen in der Praxis
Föderierte Datenhaltung	Datenhoheit bleibt erhalten, Dienste bleiben nutzbar
Verwaltungsschalen (AAS)	Herstellerübergreifende Wiederverwendung von Informationen
Containerisierte Dienste	Einfache Bereitstellung, Skalierung und Wartung
Trennung Datenhaltung / Analytics	Höhere Flexibilität durch entkoppelte Datenanalyse
Nutzung offener Standards	Reduzierung proprietärer Schnittstellen und Integrationsaufwände
Serviceorientierte Architektur	Mehrwertdienste hersteller- und anlagenübergreifend nutzbar
Standardisierte Servicebereitstellung	Dienste mehrfach nutzbar auf weiteren Antrieben, Anlagen und Organisationen
Wiederverwendbare Cloud-Services	Skalierbare Dienste erhöhen Wirtschaftlichkeit und Wiederverwendung / Reduzierung Integrationsaufwände

Tabelle 6: Architektur- und Umsetzungsentscheidungen und ihr praktischer Nutzen

Die im Projekt entwickelten Servicekonzepte adressieren zunächst klassische Anwendungsfelder wie Monitoring, Zustandsüberwachung, Diagnose und datenbasierte Optimierung. Gleichzeitig schaffen sie die Grundlage für **zukünftige Industrial-AI-Anwendungen**. Leistungsfähige KI-Systeme benötigen strukturierte, interoperabel verfügbare Daten, semantischen Kontext sowie einen vertrauenswürdigen Zugriff auf verteilte Informationsquellen. **Verwaltungsschalen**, **standardisierte Informationsmodelle** und **Datenräume** schaffen hierfür die notwendigen Voraussetzungen. Die im Projekt entwickelten Servicearchitekturen zeigen exemplarisch, wie aus interoperabel bereitgestellten Daten

schrittweise intelligente Assistenz-, Analyse- und Optimierungsfunktionen entstehen können und bilden damit eine Vorstufe zukünftiger KI-gestützter Dienste (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026b; ZVEI, 2025b).

Die **Machbarkeitsstudie Antrieb 4.0** bestätigt damit die technische Realisierbarkeit interoperabler Datenräume für industrielle Antriebssysteme. Die Projektergebnisse zeigen zugleich, dass erfolgreiche Datenräume nicht allein durch Technologien entstehen. Entscheidend sind eine gemeinsame semantische Grundlage, die konsequente Nutzung standardisierter Informationen in Anwendungen sowie geeignete Governance-Strukturen. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 liefern damit nicht nur einen Machbarkeitsnachweis, sondern konkrete Orientierungspunkte für zukünftige Manufacturing-X-, Gaia-X- und Datenrauminitiativen. **Datenräume werden damit zu einem Enabler für datengetriebene und KI-gestützte Wertschöpfung**, indem sie die Grundlage für interoperable Services, organisationsübergreifende Zusammenarbeit und zukünftige Industrial-AI-Anwendungen schaffen.

9. Der Weg in die Praxis – Empfehlungen für Unternehmen

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie **Antrieb 4.0** zeigen, dass die technologischen Grundlagen für interoperable Datenräume bereits heute verfügbar sind. Verwaltungsschalen, standardisierte Kommunikationsschnittstellen, föderierte Datenraumtechnologien sowie datengetriebene Services konnten im Projekt erfolgreich umgesetzt und unter realen Bedingungen validiert werden. Für Unternehmen stellt sich damit zunehmend nicht mehr die Frage, ob Datenräume technisch realisierbar sind, sondern wie der eigene Einstieg in solche Ökosysteme gestaltet werden kann. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 verdeutlichen, dass **Datenraumfähigkeit** nicht durch die Einführung einer einzelnen Technologie entsteht. Vielmehr handelt es sich um ein Zusammenspiel aus Standardisierung, semantischer Interoperabilität, serviceorientierter Wertschöpfung und organisatorischer Verankerung. Aus den Projektergebnissen lassen sich vier zentrale Handlungsfelder ableiten, die Unternehmen auf ihrem Weg in zukünftige Datenraumökosysteme berücksichtigen sollten.

Handlungsfelder	Umsetzungsziel
Standards	Interoperabilität zwischen Systemen und Organisationen sicherstellen
Semantik	Informationen maschineninterpretierbar und wiederverwendbar beschreiben
Services	Daten in konkrete Mehrwertdienste überführen
Organisation	Governance, Verantwortlichkeiten und Kompetenzen etablieren

Tabelle 7: Vier Handlungsfelder auf dem Weg in den Datenraum

9.1 Standards als Grundlage zukünftiger Interoperabilität

Die Erfahrungen aus dem Demonstrator zeigen, dass die Nutzung etablierter Standards eine wesentliche Voraussetzung für die Integration unterschiedlicher Systeme darstellt. Standards wie OPC UA oder die Asset Administration Shell reduzieren Integrationsaufwände und schaffen die Grundlage für die herstellerübergreifende Nutzung von Informationen und Diensten (vgl. OPC Foundation, 2024; IDTA, 2024). Gleichzeitig wurde deutlich, dass **Standards allein keine Interoperabilität garantieren**. Unternehmen sollten bestehende Spezifikationen nutzen und deren Weiterentwicklung aktiv mitgestalten. Insbesondere semantische Modelle und domänenspezifische Informationsstrukturen erfordern weiterhin gemeinsame Abstimmung. Für den Einstieg in Datenräume empfiehlt es sich, bestehende Anlagen und Systeme schrittweise auf standardisierte Schnittstellen und Informationsmodelle auszurichten.

9.2 Informationen semantisch beschreiben und nutzbar machen

Die Projektergebnisse zeigen, dass die eigentliche Herausforderung häufig nicht im Datenaustausch, sondern in der **eindeutigen Interpretation von Informationen** liegt. Daten können nur dann organisationsübergreifend genutzt werden, wenn ihre Bedeutung eindeutig beschrieben ist. Unternehmen sollten frühzeitig beginnen, Produkt-, Anlagen- und Betriebsinformationen strukturiert zu erfassen und mit standardisierten Merkmalen, Klassifikationen und Verwaltungsschalen zu verknüpfen. Vollständige digitale Zwillinge für sämtliche Produkte und Anlagen sind dafür nicht erforderlich. Erfolgversprechender ist ein schrittweises Vorgehen, bei dem zunächst die für konkrete Anwendungsfälle relevanten Informationen harmonisiert werden. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 zeigen, dass semantische

Interoperabilität eine der wichtigsten Voraussetzungen für die spätere Skalierung datengetriebener Dienste darstellt.

> **Nicht mit einem umfassenden digitalen Zwilling beginnen**
>
> Unternehmen müssen nicht sofort vollständige digitale Zwillinge für ihre Produkte und Anlagen aufbauen. Erfolgversprechender ist ein schrittweises Vorgehen, bei dem zunächst die für konkrete Anwendungsfälle relevanten Informationen harmonisiert und standardisiert werden.

9.3 Service-Readiness für datengetriebene Wertschöpfung

Eine zentrale Erkenntnis der Machbarkeitsstudie besteht darin, dass der eigentliche Nutzen von Datenräumen **durch Mehrwertdienste** entsteht. Die im Projekt entwickelten Dienste verdeutlichen dieses Potenzial exemplarisch. Unternehmen sollten Datenrauminitiativen daher konsequent aus der Perspektive zukünftiger Mehrwertdienste betrachten. Nicht die Frage „Welche Daten können wir bereitstellen?“ sollte im Mittelpunkt stehen, sondern „Welche Mehrwerte können wir mit diesen Daten erzeugen?“. Service-Readiness umfasst technische Voraussetzungen wie standardisierte Datenmodelle, Schnittstellen und Identitätsmanagement sowie organisatorische Aspekte wie Verantwortlichkeiten, Nutzungsbedingungen und Zugriffsregelungen. Die Projektergebnisse legen nahe, Datenräume konsequent serviceorientiert zu denken und Mehrwertdienste frühzeitig als Zielbild zu definieren.

> **Der Nutzen entsteht durch konkrete Anwendungsfälle**
>
> Nicht die Frage „Welche Daten können wir bereitstellen?“ sollte im Mittelpunkt stehen, sondern „Welche Mehrwerte können wir mit diesen Daten erzeugen?“

9.4 Datenhoheit erhalten und gleichzeitig Mehrwert schaffen

Ein häufiges Hemmnis für die Teilnahme an Datenräumen ist die Sorge vor dem Verlust der Kontrolle über eigene Daten. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 zeigen jedoch, dass **Datensouveränität und datengetriebene Zusammenarbeit** miteinander vereinbar sind. Im Demonstrator verblieben die Betriebsdaten grundsätzlich bei den jeweiligen Eigentümern, während über den Datenraum lediglich Metadaten, Beschreibungen und kontrollierte Zugriffsmechanismen bereitgestellt wurden. Monitoring-, Analyse- und Engineeringdienste konnten dennoch erfolgreich realisiert werden (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023). Unternehmen sollten Datensouveränität daher nicht als Einschränkung betrachten, sondern als bewusstes Architekturprinzip zukünftiger Datenökosysteme verstehen. Die Fähigkeit, Daten kontrolliert freizugeben und gleichzeitig die Hoheit über deren Nutzung zu behalten, wird zunehmend zu einem Wettbewerbsfaktor.

9.5 Datenraumfähigkeit organisatorisch verankern

Die Projekterfahrungen zeigen, dass **Datenräume nicht ausschließlich technische Systeme sind**. Ebenso entscheidend sind organisatorische Strukturen zur nachhaltigen Pflege und Nutzung der

bereitgestellten Informationen. Damit bestätigen die Ergebnisse eine zentrale Erkenntnis aktueller Manufacturing-X- und Factory-X-Initiativen: Der Aufbau interoperabler Datenökosysteme ist weniger eine technologische als vielmehr eine organisatorische Transformationsaufgabe (vgl. Factory-X Consortium, 2024; Plattform Industrie 4.0, 2026a). Dazu gehören Prozesse zur Sicherstellung der Datenqualität, Verantwortlichkeiten für die Pflege semantischer Modelle sowie klare Regelungen für die Freigabe und Nutzung von Informationen. Gleichzeitig müssen Kompetenzen in Bereichen wie Datenmodellierung, Verwaltungsschalen, Datenraumtechnologien und serviceorientierter Softwareentwicklung aufgebaut werden. Unternehmen sollten Datenraumfähigkeit daher nicht als isoliertes IT-Projekt betrachten, sondern als langfristige organisatorische Entwicklung, die verschiedene Fachbereiche einbezieht.

9.6 Get Ready for Datenraum Antrieb 4.0

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zeigen, dass der Einstieg in Datenräume kein Zukunftsszenario mehr ist. Die notwendigen Technologien und Standards stehen heute bereits zur Verfügung und wurden im Projekt erfolgreich validiert. Gleichzeitig verdeutlichen die Erfahrungen aus Antrieb 4.0, dass **Datenraumfähigkeit** nicht durch einzelne Technologien entsteht, sondern durch das Zusammenspiel von Standardisierung, Semantik, Services und Governance. Unternehmen, die bereits heute Informationsmodelle harmonisieren, Verwaltungsschalen aufbauen, standardisierte Schnittstellen etablieren und erste datengetriebene Anwendungsfälle umsetzen, schaffen die Voraussetzungen für eine aktive Rolle in zukünftigen Datenraumökosystemen. Die Projektergebnisse zeigen, dass sich dadurch technische Interoperabilität, neue Formen der Zusammenarbeit und datengetriebene Wertschöpfung gleichermaßen fördern lassen. Die nachfolgende Roadmap und die technische Checkliste unterstützen Unternehmen dabei, den eigenen Entwicklungsstand einzuordnen und konkrete nächste Schritte abzuleiten. Sie verstehen sich nicht als starres Reifegradmodell, sondern als **praxisnahe Orientierung** auf dem Weg zu datenraumfähigen Produkten, Systemen und Services.

> **Praxishinweis**
>
> Unternehmen müssen nicht mit einer vollständig ausgebauten Datenraumarchitektur starten. Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 zeigen, dass bereits erste Schritte, beispielsweise die Einführung standardisierter Schnittstellen, die Nutzung von Verwaltungsschalen oder die Umsetzung einzelner Monitoring-Services, einen konkreten Nutzen schaffen und zugleich die Grundlage für spätere Ausbaustufen bilden.

Von der Digitalisierung zur Datenraumfähigkeit

Entwicklungspfad datenraumfähiger Produkte, Systeme und Services

Der nachfolgende Entwicklungspfad zeigt typische Ausbaustufen auf dem Weg zu datenraumfähigen Produkten, Systemen und Services. Unternehmen können – abhängig von ihrer Ausgangssituation – auf unterschiedlichen Stufen einsteigen und den nächsten sinnvollen Entwicklungsschritt gezielt umsetzen. Datenraumfähigkeit entsteht nicht durch die Einführung einer einzelnen Technologie, sondern durch den systematischen Aufbau standardisierter Kommunikation, semantischer Informationsmodelle, Verwaltungsschalen, Datenraumtechnologien und daten-getriebener Services.

STUFE 1

Digitale Transparenz schaffen

- ☐ Produkte identifizieren
- ☐ Betriebsdaten verfügbar
- ☐ OPC UA nutzen

STUFE 2

Gemeinsame Informationsbasis schaffen

- ☐ Verwaltungsschale (AAS)
- ☐ Semantische Informationsmodelle etablieren
- ☐ ECLASS als gemeinsame Informationssprache nutzen

STUFE 3

Datenraumfähigkeit aufbauen

- ☐ Datenraum-Connector integrieren (z.B. MX-Port)
- ☐ Rollen- und Berechtigungskonzepte etablieren
- ☐ Dynamische Betriebsdaten bereitstellen

STUFE 4

Mehrwert realisieren

- ☐ Monitoring- und Analyse-Services
- ☐ Engineering und Betrieb verbinden
- ☐ Optimierung ermöglichen

STUFE 5

Im Datenökosystem skalieren

- ☐ Services bereitstellen und nutzen
- ☐ Kooperationen aufbauen
- ☐ Digitale Geschäftsmodelle entwickeln
- ☐ Industrial-AI-Anwendungen ermöglichen

Orientierung

Die fünf Entwicklungsstufen stellen kein starres Reifegradmodell dar. Unternehmen können abhängig von ihrer Ausgangssituation unterschiedliche Einstiegspunkte wählen. Entscheidend ist, den nächsten sinnvollen Entwicklungsschritt konsequent umzusetzen.

Praxishinweis

Bereits erste Maßnahmen – beispielsweise die Einführung standardisierter Schnittstellen, die Nutzung von Verwaltungsschalen (AAS) oder die Umsetzung einzelner Monitoring-Services – schaffen konkreten Mehrwert und bilden gleichzeitig die Grundlage für spätere Datenraum- und Industrial-AI-Anwendungen.

Kriterien basieren auf den im Projekt Antrieb 4.0 entwickelten und validierten Architekturbausteinen. Die Checkliste dient als Orientierung und ersetzt keine projektspezifische Systemanalyse.

Technischer Datenraum-Readiness-Check

antrieb 4.0

Wie datenraumfähig sind Ihre Systeme?

Der technische Datenraum-Readiness-Check unterstützt Unternehmen dabei, den technischen Reifegrad ihrer Systeme anhand der im Projekt Antrieb 4.0 entwickelten und validierten Architekturbausteine einzuordnen. Bereits einzelne Maßnahmen schaffen konkreten Mehrwert und bilden die Grundlage für zukünftige datenraumgestützte Services und Industrial-AI-Anwendungen. Die drei Phasen orientieren sich an der im Projekt entwickelten Referenzarchitektur.

PHASE 1

Digitale Grundlagen

Reifegrad: Digitalisieren

Transparenz und Standardisierung schaffen

- ☐ Maschinen eindeutig identifizierbar
- ☐ OPC UA oder standardisierte Kommunikation vorhanden
- ☐ Betriebsdaten digital verfügbar
- ☐ Erste Asset Administration Shells (AAS) vorhanden
- ☐ ECLASS bzw. standardisierte Merkmalsbeschreibung genutzt
- ☐ Produktinformationen maschinenlesbar verfügbar

PHASE 2

Datenraum vorbereiten

Reifegrad: Vernetzen

Interoperabilität und Datensouveränität etablieren

- ☐ Edge-Datenhaltung vorhanden
- ☐ Instanz-AAS mit Betriebsdaten verknüpft
- ☐ Rollen- und Berechtigungskonzept definiert
- ☐ Datenraum-Connector integriert
- ☐ Kontrollierte Datenfreigabe möglich
- ☐ Monitoring- oder Analytics-Service implementiert

PHASE 3

Datengetriebene Wertschöpfung

Reifegrad: Optimieren

Services skalieren und Industrial AI ermöglichen

- ☐ Engineering- und Betriebsdaten verknüpft
- ☐ Monitoring-Services produktiv
- ☐ Auslegungs- oder Verifikationsservices vorhanden
- ☐ Interoperabler Datenaustausch mit Partnern
- ☐ Daten dienen kontinuierlicher Optimierung
- ☐ Kontextualisierte Daten für Industrial-AI-Anwendungen verfügbar

DATENRAUM-READINESS

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4	LEVEL 5
Digitalisieren	Standardisieren	Vernetzen	Services etablieren	Industrial AI Ready

Auswertung

0–5 Punkte: Grundlagen aufbauen

Standardisierte Kommunikation, semantische Modelle und digitale Produktinformationen schaffen.

6–11 Punkte: Datenraum vorbereiten

Architektur gezielt erweitern und erste interoperable Services etablieren.

12–18 Punkte: Datenraumfähig

Sehr gute Voraussetzungen für interoperable Services, Manufacturing-X und zukünftige Industrial-AI-Anwendungen.

Praxishinweis

Bereits die Umsetzung einzelner Kriterien schafft konkreten Mehrwert. Datenraumfähigkeit entsteht schrittweise – nicht durch die Einführung einer einzelnen Technologie, sondern durch das Zusammenspiel standardisierter Kommunikation, semantischer Informationsmodelle, Verwaltungsschalen und interoperabler Services.

10. Vom Datenraum zur Industrial AI

Die im **Reallabor Antrieb 4.0** entwickelten Architekturen, Technologien und Services wurden nicht als isolierte Einzellösungen konzipiert. Vielmehr adressieren sie grundlegende Fragestellungen, die aktuell auch im Umfeld von Manufacturing-X, Datenräumen und Industrial AI diskutiert werden. Die Projektergebnisse zeigen, wie bestehende Standards und Technologien zu einer interoperablen Infrastruktur für datengetriebene Wertschöpfung zusammengeführt werden können und welche Bedeutung diese Erfahrungen für zukünftige industrielle Datenökosysteme besitzen.

10.1 Datenräume als Fundament der Wertschöpfung

Die Ergebnisse des **Reallabors Antrieb 4.0** zeigen, dass interoperable Datenräume für industrielle Antriebssysteme bereits heute auf Basis verfügbarer Standards und Technologien praktisch umgesetzt werden können. Im Projekt wurden Verwaltungsschalen, standardisierte Informationsmodelle, Datenraumkomponenten, Edge- und Cloud-Infrastrukturen sowie datengetriebene Dienste erfolgreich integriert und in einer herstellerübergreifenden Demonstratorumgebung validiert. Damit liefert Antrieb 4.0 nicht nur einen technologischen Demonstrator, sondern einen **konkreten Nachweis der praktischen Machbarkeit** datenraumfähiger Wertschöpfung.

Die Machbarkeitsstudie verdeutlicht zugleich, dass der eigentliche Mehrwert nicht im Datenaustausch selbst entsteht. Daten entwickeln ihren wirtschaftlichen Wert erst dann, wenn sie organisationsübergreifend nutzbar gemacht und für konkrete betriebliche Fragestellungen eingesetzt werden können. Die im Projekt entwickelten Services zur energieeffizienten Auslegung und Auslegungsverifikation zeigen exemplarisch, wie aus interoperabel bereitgestellten Daten konkrete betriebliche, wirtschaftliche und ökologische Mehrwerte entstehen können. Die Ergebnisse bestätigen damit aktuelle Arbeiten zu Datenräumen und digitalen Ökosystemen, die Daten zunehmend als eigenständigen Produktionsfaktor betrachten (vgl. BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023; Plattform Industrie 4.0, 2026a).

Eine besondere Bedeutung kommt der **Asset Administration Shell (AAS)** zu. Im Projekt diente sie nicht lediglich als digitale Beschreibung einzelner Komponenten, sondern als zentraler Integrationsanker zwischen Engineering-Daten, Betriebsdaten, Datenraumdiensten und digitalen Services. Durch die standardisierte Beschreibung von Eigenschaften, Fähigkeiten und Beziehungen konnten Informationen unterschiedlicher Herkunft interoperabel bereitgestellt und organisationsübergreifend genutzt werden. Die Verwaltungsschale entwickelte sich damit vom digitalen Zwilling einzelner Assets zu einem zentralen Baustein datengetriebener Wertschöpfung (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; IDTA, 2024).

Ergänzt wurde dieser Ansatz durch standardisierte Informationsmodelle und semantische Beschreibungen. Erst sie ermöglichen die **eindeutige Interpretation von Informationen** über Unternehmens-, Hersteller- und Systemgrenzen hinweg. Interoperabilität entsteht nicht durch Datenaustausch allein, sondern durch ein gemeinsames Verständnis der Bedeutung der ausgetauschten Informationen. Verwaltungsschalen und Informationsmodelle bilden damit gemeinsam die semantische Grundlage für die Nutzung von Daten in digitalen Ökosystemen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022a; ZVEI / IDTA, 2026). Die Projektergebnisse lassen sich dabei als aufeinander aufbauende Wertschöpfungsstufen verstehen. Verwaltungsschalen, semantische Informationsmodelle und föderierte Datenräume bilden die technische und organisatorische Grundlage für digitale Services und datengetriebene Wertschöpfung. Gleichzeitig entstehen damit die Voraussetzungen für **zukünftige Industrial-AI-Anwendungen**, die auf interoperablen und kontextualisierten Informationen aufbauen.

Wertschöpfungsstufe	Beitrag von Antrieb 4.0
Asset Administration Shell	Standardisierte Beschreibung von Assets, Eigenschaften und Fähigkeiten
Informationsmodelle und Semantik	Gemeinsames Verständnis und interoperable Interpretation von Informationen
Föderierter Datenraum	Souveräne, organisationsübergreifende Nutzung von Daten
Digitale Services	Umsetzung konkreter Mehrwertdienste auf Basis interoperabler Daten
Datengetriebene Wertschöpfung	Optimierung, Kollaboration und neue digitale Geschäftsmodelle
Industrial AI	Interoperable und kontextualisierte Daten als Grundlage für KI-Anwendungen

Tabelle 8: Von der AAS zur Industrial AI – Beitrag der Projektergebnisse

Von der Verwaltungsschale zur Industrial AI – Beitrag der Projektergebnisse entlang der Wertschöpfungskette

Die Machbarkeitsstudie zeigt damit, dass die Grundlage zukünftiger datengetriebener Wertschöpfung nicht in einzelnen Technologien liegt, sondern im Zusammenspiel standardisierter Informationsmodelle, interoperabler Datenräume und nutzbringender Dienste. Datenräume schaffen die Infrastruktur, semantische Standards ermöglichen die Interoperabilität und digitale Services erzeugen den wirtschaftlichen Nutzen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a; BMWK; Plattform Industrie 4.0, 2023). Die im Projekt geschaffenen Grundlagen besitzen jedoch nicht nur Bedeutung für die betrachtete Domäne industrieller Antriebssysteme. Sie adressieren zugleich zentrale Anforderungen aktueller Initiativen zur organisationsübergreifenden Datennutzung und liefern praktische Erfahrungen für die Umsetzung datenraumbasierter Wertschöpfungsnetzwerke.

10.2 Von der Machbarkeitsstudie zu Manufacturing-X

Mit Manufacturing-X entsteht derzeit eine föderierte Datenökonomie für die industrielle Wertschöpfung. Ziel ist es, Daten organisationsübergreifend nutzbar zu machen und gleichzeitig die Datensouveränität der beteiligten Unternehmen zu erhalten. Offene Standards, Interoperabilität, Verwaltungsschalen und vertrauenswürdige Datenräume bilden dabei zentrale Grundprinzipien (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a; Factory-X Consortium, 2024). Das Reallabor Antrieb 4.0 liefert für diese Entwicklung eine konkrete industrielle Referenz. Die im Projekt entwickelte Architektur demonstriert exemplarisch, wie Verwaltungsschalen, semantische Informationsmodelle, Datenraumtechnologien und digitale Dienste in einer realen industriellen Domäne zusammenwirken können. Die Projektergebnisse zeigen, dass die technischen Grundlagen datenraumfähiger Wertschöpfungsnetzwerke bereits heute verfügbar sind und auf etablierten Industriestandards aufbauen können. Gleichzeitig verdeutlichen die Projekterfahrungen, dass die erfolgreiche Skalierung solcher Ökosysteme nicht allein von Technologie abhängt. Die technische Interoperabilität erwies sich in vielen Fällen als einfacher realisierbar als die organisationsübergreifende Abstimmung gemeinsamer Informationsmodelle, Prozesse und Verantwortlichkeiten. Erfolgreiche Datenökosysteme benötigen daher nicht nur technische Standards, sondern ebenso gemeinsame Governance-Strukturen, Vertrauen zwischen den beteiligten Akteuren und

nachvollziehbare wirtschaftliche Mehrwerte (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a; Factory-X Consortium, 2024). Besondere Bedeutung besitzt dies für kleine und mittlere Unternehmen. Die Projektergebnisse zeigen, dass Datensouveränität, Cybersicherheit und wirtschaftlicher Nutzen keine Gegensätze darstellen müssen. Gleichzeitig wird deutlich, dass Datenökosysteme ihren Mehrwert nur dann vollständig entfalten können, wenn eine breite Beteiligung unterschiedlicher Akteure gelingt. Datengetriebene Wertschöpfung besitzt einen ausgeprägten Netzwerkeffekt: Je mehr Unternehmen Daten und Dienste interoperabel bereitstellen und nutzen, desto größer wird der Nutzen für das gesamte Ökosystem (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026a; Factory-X Consortium, 2024).

Antrieb 4.0 liefert damit nicht nur einen technischen Demonstrator, sondern zugleich praktische Erfahrungen für die Umsetzung der Grundprinzipien von Manufacturing-X in industriellen Domänen. Datenräume ermöglichen die organisationsübergreifende Nutzung von Informationen bei gleichzeitigem Erhalt der Datensouveränität. Dies wird durch digitale Identitäten, Zugriffskontrollen und föderierte Datenhaltung unterstützt.

10.3 Industrial AI braucht Datenräume

Die Bedeutung der im Projekt geschaffenen Grundlagen wird insbesondere im Kontext aktueller Entwicklungen im Bereich Industrial AI sichtbar. Aktuelle Arbeiten der Plattform Industrie 4.0 beschreiben diese Entwicklung als Übergang von der Vernetzung hin zur intelligenten Nutzung von Daten, Wissen und digitalen Diensten. Industrial AI wird dabei nicht als isolierte Technologie verstanden, sondern als Bestandteil eines umfassenden digitalen Ökosystems, in dem Daten, digitale Zwillinge, Dienste und Akteure organisationsübergreifend zusammenwirken (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026b). Leistungsfähige KI-Anwendungen benötigen nicht nur große Datenmengen. Entscheidend sind vielmehr qualitativ hochwertige, strukturierte und interoperabel verfügbare Informationen, die in ihrem fachlichen Kontext verstanden und vertrauenswürdig genutzt werden können. Genau diese Voraussetzungen wurden im Projekt adressiert. Verwaltungsschalen schaffen den notwendigen Kontext, Informationsmodelle ermöglichen ein gemeinsames Verständnis der Daten und Datenräume stellen diese Informationen organisationsübergreifend und souverän bereit (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026b; ZVEI, 2025b).

In diesem Sinne können die im Projekt entwickelten Architekturen und Dienste als Vorstufe zukünftiger Industrial-AI-Anwendungen verstanden werden. Die entwickelten Services nutzen bereits heute Informationen aus unterschiedlichen Quellen, verknüpfen diese mit domänenspezifischem Wissen und leiten daraus konkrete Empfehlungen und Optimierungspotenziale ab. Damit zeigen sie exemplarisch den Übergang von der reinen Datenbereitstellung zur intelligenten Nutzung von Informationen. Industrial AI beginnt damit nicht erst bei der Entwicklung von KI-Modellen. Sie beginnt bei der Schaffung interoperabler Daten- und Informationsräume. Die im Projekt geschaffenen Grundlagen bilden daher nicht nur die Basis datengetriebener Services, sondern zugleich eine wesentliche Voraussetzung für zukünftige KI-gestützte Assistenz-, Analyse- und Optimierungsfunktionen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2026b; ZVEI, 2025b). Die im Projekt geschaffenen technologischen Grundlagen und die gewonnenen praktischen Erfahrungen zeigen, dass wesentliche Voraussetzungen für datengetriebene Wertschöpfung bereits heute verfügbar sind. Gleichzeitig verdeutlichen sie, dass die weitere Verbreitung datenraumfähiger Lösungen vor allem von ihrer Skalierung in industrielle Ökosysteme abhängen wird.

10.4 Ausblick

Die Ergebnisse von Antrieb 4.0 markieren keinen Endpunkt, sondern einen Ausgangspunkt für die nächste Entwicklungsphase industrieller Digitalisierung. Während die Machbarkeitsstudie die technische Realisierbarkeit datenraumfähiger Antriebssysteme nachgewiesen hat, liegt die zukünftige Herausforderung in der Skalierung dieser Konzepte auf größere Wertschöpfungsnetzwerke und industrielle Ökosysteme. Dabei rücken insbesondere die Integration bestehender Brownfield-Systeme, die Einbindung kleiner und mittlerer Unternehmen, die Harmonisierung semantischer Informationsmodelle sowie die Weiterentwicklung datengetriebener Dienste in den Mittelpunkt. Ebenso gewinnen aktuelle Entwicklungen wie die zunehmende Konvergenz von Verwaltungsschalen und OPC-UA-Informationsmodellen, die Weiterentwicklung von OPC UA FX sowie die praktische Umsetzung von Manufacturing-X-Konzepten in industriellen Domänen an Bedeutung (vgl. OPC Foundation, 2024; Plattform Industrie 4.0, 2026a).

Die Erfahrungen aus Antrieb 4.0 zeigen jedoch, dass die hierfür notwendigen technologischen Grundlagen bereits heute verfügbar sind. Offene Standards, Verwaltungsschalen, semantische Informationsmodelle und föderierte Datenräume ermöglichen bereits heute die Realisierung interoperabler Datenökosysteme. Die im Projekt entwickelten Architekturen, Dienste und Erfahrungen liefern damit nicht nur eine Referenz für zukünftige Datenraumprojekte, sondern zugleich einen Baustein für die Weiterentwicklung datengetriebener Wertschöpfung, digitaler Ökosysteme und zukünftiger Industrial-AI-Anwendungen in der Industrie. In diesem Sinne versteht sich Antrieb 4.0 als Brücke zwischen den Visionen von Industrie 4.0, den Zielbildern von Manufacturing-X und ihrer praktischen Umsetzung in industriellen Anwendungen. Die Projektergebnisse zeigen, dass der Weg von der Verwaltungsschale über den Datenraum bis hin zu datengetriebenen Services und zukünftigen Industrial-AI-Anwendungen nicht mehr Vision, sondern zunehmend industrielle Realität ist.

Literatur

Berners-Lee, T. (2006): *Linked Data*. Design Issues. W3C. Zugriff 13.06.2026. Verfügbar unter: https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html

BMWK; Plattform Industrie 4.0 (2023): *Förderkonzept zur Unterstützung der Industrieinitiative „Manufacturing-X“*. Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) (Hrsg.) (2026): *Manufacturing-X – Datenökosysteme für eine wettbewerbsfähige, resiliente und nachhaltige Industrie*. Berlin: BMWE.

ECLASS e.V. (2025): ECLASS Standard – Internationale Klassifikation und semantische Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen. Köln.

Factory-X Consortium (2024): *Factory-X Vision and Objectives.* Berlin.

Factory-X Consortium (2025): *Geschäftsmodelle in industriellen Datenökosystemen – Grundlagen und Perspektiven.* Zugriff 13.04.2026. Verfügbar unter: https://factory-x.org/wp-content/uploads/Daten-und-serviceorientierte-Geschaftsmodelle-in-Factory-X-V1.1.pdf

IEC (2021): IEC 62541-4:2020 – OPC Unified Architecture – Part 4: Services. Geneva.

IEC (2025): IEC 62541-1:2025 – OPC Unified Architecture – Part 1: Overview and Concepts. Geneva.

IEEE (2019): IEEE 1588-2019 – Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Piscataway, NJ.

IEEE Standards Association (2025): Time-Sensitive Networking (TSN). Piscataway, NJ.

Industrial Digital Twin Association (IDTA) (2024): *Sizing of Power Drive Trains. Submodel Template of the Asset Administration Shell (IDTA 02021-1-0)*. Version 1.0. Frankfurt am Main: IDTA.

OPC Foundation (2024): OPC Unified Architecture (OPC UA) – Interoperability for Industrie 4.0 and Industrial IoT. Scottsdale, AZ.

Plattform Industrie 4.0 (2019): *Details of the Asset Administration Shell – Part 1: The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 2.0.1)*. Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2022a): *Details of the Asset Administration Shell – Part 1: The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02)*. Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2022b): Whitepaper „Manufacturing-X“. Eckpunkte für die Umsetzung von „Manufacturing-X“ im produzierenden Gewerbe zur Sicherung des Wettbewerbsstandortes Deutschland. Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2023a): *Digitale Geschäftsmodelle und Wertschöpfung in Datenräumen für die Industrie.* Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2023b): *Manufacturing-X – Datenökosysteme für die Industrie.* Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2024): *Industrielle Datenökosysteme und Manufacturing-X.* Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2025): *Der monetäre Wertschöpfungsbeitrag von Datenräumen – Analyse und Berechnung. Berlin.*

Plattform Industrie 4.0 (2026): *Manufacturing-X – Datenökosysteme für eine wettbewerbsfähige, resiliente und nachhaltige Industrie*. Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2026a): *Daten als Produktionsfaktor – Bedeutung und Mehrwert industrieller Datenökosysteme*. Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2026b): *Empowering Industrial AI – Industrielle Datenökosysteme als Grundlage KI-gestützter Wertschöpfung*. Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2026c): *Aufbruch in die KI-gestützte Wertschöpfung – Chancen neuer Geschäftsmodelle durch Industrial AI. Berlin (mit Fraunhofer ISST und Accenture).*

Solid Community Group (2024): *Solid Protocol Specification*. W3C Community Group Report. Zugriff 13.06.2026. Verfügbar unter: https://solidproject.org/TR/protocol

Story, H.; Harbulot, B.; Jacobi, I.; Jones, M. (2014): *WebID 1.0: Web Identification and Discovery*. W3C Editor's Draft.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2018): *Vision Antrieb 4.0. Zukunftsbild der industriellen Antriebstechnik.* Frankfurt am Main.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2020): *Antrieb 2030. Zukunftsperspektiven der industriellen Antriebstechnik.* Frankfurt am Main.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2025a): *Noch keine Trendumkehr für Elektro- und Digitalindustrie in Sicht.* Presseinformation vom 29. Januar 2025. Frankfurt am Main.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2025b): *Industrial AI – Schlüsseltechnologie für die Zukunft der Elektro- und Digitalindustrie*. Frankfurt am Main.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2025c): *Vom Automatisieren zum Agieren: Mit Agentic AI zur Software Defined Industry*. Frankfurt am Main: ZVEI.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2025d): Statistischer Jahresbericht 2024/2025 *Elektrische Antriebe.*

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2026): *Die deutsche Elektro- und Digitalindustrie – Daten, Zahlen und Fakten.* Frankfurt am Main.

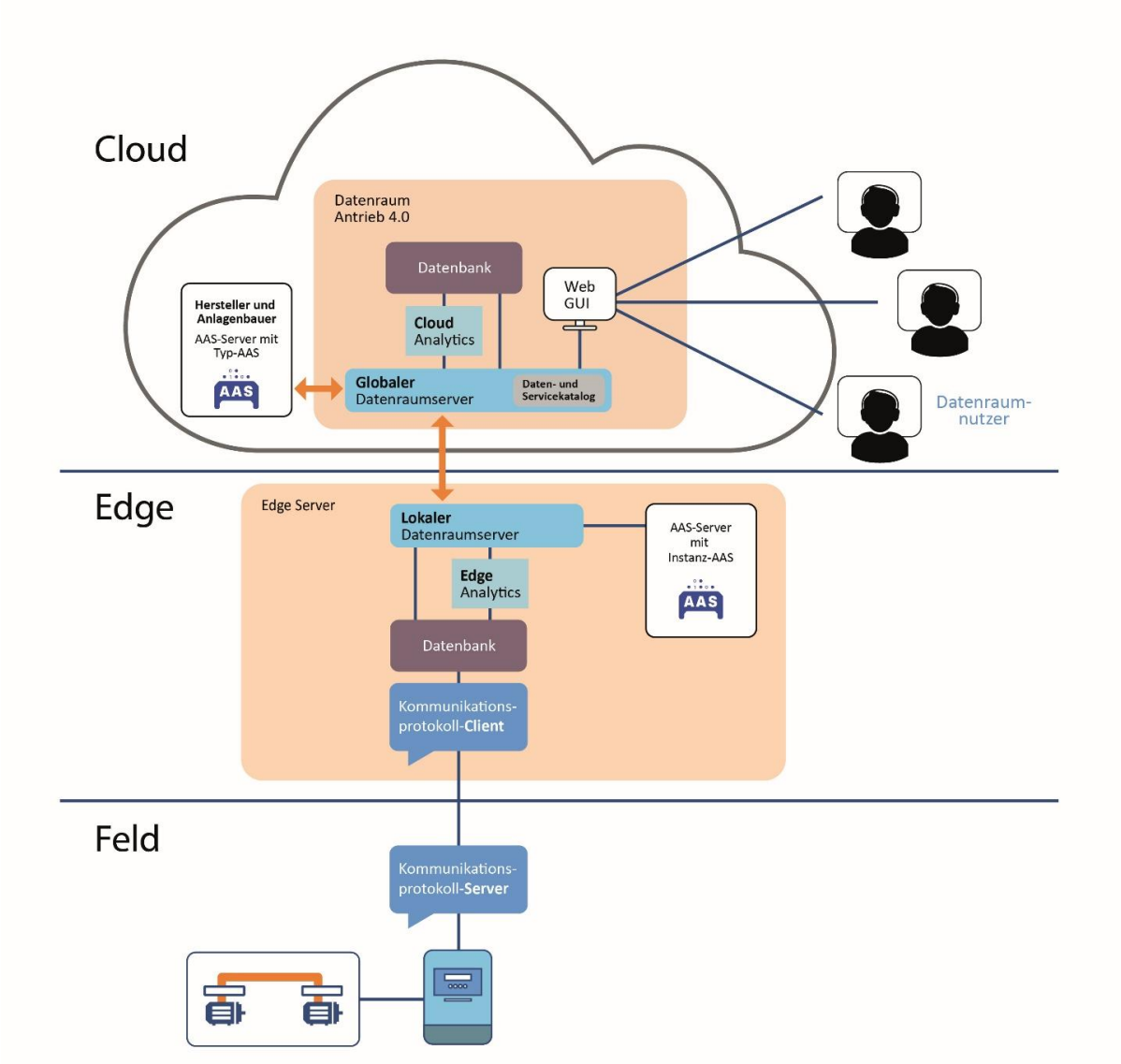
ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2026a): *Künstliche Intelligenz für industrielle Systeme*. Frankfurt am Main.

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2026b): *Antrieb 2035 – Weiterentwicklung der Antrieb-2030-Thesen*. Entwurfassung. Frankfurt am Main. (noch unveröffentlicht)

ZVEI / IDTA (2026): *AAS in der Antriebstechnik – Praxisleitfaden für den Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt am Main.

Anhang

Referenzarchitektur des Demonstrators Antrieb 4.0



Quelle: Fraunhofer IIS

AutorInnen und Mitwirkende

Dr. Falk Eckert, ZVEI
Dr. Jan Hofmann, Fraunhofer IIS
Christoph Blechinger, Fraunhofer IISB
Ivan Kiasheu, TU Darmstadt
Vadim Pribylov, TU Darmstadt
Lara Klöhn, Fraunhofer IIS
Tomás López Mendez, Fraunhofer IIS
Marco Hauff, Fraunhofer IIS
Dr. Martin Schellenberger, Fraunhofer IISB

Bernd Wacker, Siemens AG
Chengbo Zhou, TU Darmstadt
Dr. Georg Röder, Fraunhofer IISB
Martin Hankel, Bosch Rexroth GmbH
Michael Burghardt, Danfoss GmbH

Fotos: William Veder · Eventfotografie, https://williamveder.de/

Mensch und Maschine in Zusammenarbeit: Entsprechend dem Gegenstand dieses Whitepapers wurde auch bei seiner Erstellung auf die Zusammenarbeit von Menschen und Technologie gesetzt: Generative KI unterstützte ausgewählte redaktionelle Arbeitsschritte. Die wissenschaftliche Einordnung, Interpretation der Ergebnisse und die Verantwortung für Inhalt und Aussagen verblieben jederzeit bei den Autorinnen und Autoren.

Impressum und Kontakt

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V.

Postanschrift

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e. V. (FE)
(ZVEI Research Association Electrical Engineering)
Amelia-Mary-Earhart-Str. 12
60549 Frankfurt am Main
Telefon: +49 151 522 71 522
Web: http://www.fe-zvei.org

Projektbüro Berlin Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e. V. (FE)
Charlottenstraße 35
10117 Berlin

Die Konsortialpartner

Fraunhofer IIS

Fraunhofer IISB

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

zvei electrifying ideas

Die assoziierten Partner

ABB

BAUMÜLLER

Danfoss

ESR Pollmeier GmbH Servo-Antriebstechnik

INNOMOTICS

KEB

KEBA Automation by innovation.

KSB

LENORD +BAUER

Lenze

Meta·Level SOFTWARE AG

MITSUBISHI ELECTRIC Changes for the Better

PEPPERL+FUCHS

PILZ THE SPIRIT OF SAFETY

rexroth A Bosch Company

SICK Sensor Intelligence.

SIEMENS

WITTENSTEIN

Förderhinweis

Das Forschungsprojekt „Reallabor Antrieb 4.0“ wird im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets der Bundesregierung (KoPa), Ziffer 35c – Modul a2 „Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie“, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) und der Europäischen Union aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Forschungsprojekt Antrieb 4.0

Antrieb 4.0 wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Die Konsortialleitung liegt bei der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. Weitere Konsortialpartner sind: Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementechnologie IISB, die Fachgebiete Leistungselektronik und Antriebsregelung beziehungsweise Kommunikationsnetze der Technischen Universität Darmstadt, das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt, sowie 18 assoziierte Partnerunternehmen. Mehr Informationen unter: www.antrieb40.org

zvei electrifying ideas

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Fraunhofer IIS

Fraunhofer IISB