



Datenkompetenzzentrum für Circular Economy Daten

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Verfasser:

M3.1.1 Dataspace

Teil 1: Theorie und Einführung

Dissemination Level

PU (Public)

Abgabedatum

Version

1.0.0

Verantwortung: Ali Nazeri (DFKI)

Autoren

Mitarbeit:

- Ali Nazeri (DFKI)
- Abdullah, Farrukh (DFKI)



Zusammenfassung

Strategien der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) sind zunehmend auf den Austausch zuverlässiger Lebenszyklusdaten über Organisationsgrenzen hinweg angewiesen. Gleichzeitig sind CE-bezogene Informationen häufig auf heterogene Systeme verteilt, während Anforderungen hinsichtlich Interoperabilität, Vertraulichkeit und Datensouveränität die organisationsübergreifende Zusammenarbeit erschweren. Datenräume (Dataspaces) stellen einen vielversprechenden Ansatz für einen kontrollierten und dezentralen Datenaustausch in solchen Umgebungen dar. Dieser Bericht untersucht die Rolle von Datenräumen im Kontext der Kreislaufwirtschaft und analysiert relevante Technologien und Architekturen, darunter Solid, IDS-basierte Ansätze, Gaia-X, Eclipse Dataspace Connector, FIWARE und Ocean Protocol. Darüber hinaus werden zentrale Anforderungen der CE betrachtet, beispielsweise Lebenszyklus-Traceability, semantische Interoperabilität, selektiver Datenaustausch sowie die Unterstützung von Digitalen Produkt Pässen. Auf Basis dieser Analyse dokumentiert der Bericht den im DACE-Projekt gewählten Ansatz, bei dem ein Solid-basierter Datenraum als Grundlage für den Austausch CE-relevanter Daten ausgewählt wurde. Die Entscheidung für Solid basiert insbesondere auf der dezentralen Web-Architektur, der Unterstützung von Linked-Data-Technologien, der Flexibilität sowie der Eignung für Forschungs- und Prototyping-Umgebungen. Zusätzlich werden aktuelle Einschränkungen des gewählten Ansatzes, insbesondere hinsichtlich Governance und Usage Control, diskutiert.

English Version

Circular economy (CE) strategies increasingly depend on the exchange of reliable lifecycle data across organizational boundaries. However, CE-related information is often fragmented across heterogeneous systems, while concerns regarding interoperability, confidentiality, and data sovereignty complicate cross-organizational collaboration. Dataspaces have emerged as a promising approach for enabling controlled and decentralized data exchange in such environments. This report examines the role of dataspaces in CE and analyzes relevant technologies and architectures, including Solid, IDS-based approaches, Gaia-X, Eclipse Dataspace Connector, FIWARE, and Ocean Protocol. In addition, the report discusses key CE requirements such as lifecycle traceability, semantic interoperability, selective data sharing, and support for Digital Product Passports. Based on this analysis, the report documents the approach selected within the DACE project, where a Solid-based dataspace was chosen as the foundation for CE-related data exchange. The selection was motivated by Solid's decentralized Web-based architecture, support for Linked Data technologies, flexibility, and suitability for research and prototyping environments. The report also discusses current limitations of the selected approach, particularly regarding governance and usage control.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Umfang des Berichts	5
2	Grundlagen von Dataspaces	6
2.1	Konzept und Kernkomponenten	6
2.2	Governance, Datenschutz und Sicherheit	7
3	Dataspace-Technologien und -Architekturen	9
3.1	Solid	9
3.2	IDS-basierte Architekturen	10
3.3	Weitere Technologien	11
3.4	Vergleichende Analyse und Grenzen	12
4	Dataspace in der Circular Economy	14
4.1	CE-Anforderungen	14
4.2	Herausforderungen und Grenzen	14
5	DACE-Dataspace-Ansatz	16
5.1	Auswahl des Solid-basierten Ansatzes	16
6	Literaturverzeichnis	17
7	Anhang	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.1	Anhang A	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1. Komponenten eines Dataspace	7
Abbildung 2. Solid-Architektur	10
Abbildung 3. Vergleich der Solid- und der IDS-basierten Dataspace-Architektur	12
Tabelle 1. Vergleichender Überblick über Dataspace-Technologien	13



1 Einleitung

Die Circular Economy steht für einen Wandel vom traditionellen linearen Modell der Produktion und des Konsums hin zu einem ressourceneffizienteren Ansatz der Wertschöpfung. Statt der Logik „take, make, dispose“ zu folgen, zielt die CE darauf ab, Produkte, Komponenten und Materialien so lange wie möglich im Gebrauch zu halten [1], [9]. Dafür sind verlässliche Informationen über Produkte, Materialien, Lieferketten und Lebenszyklusprozesse erforderlich. Ohne vertrauenswürdige und zugängliche Lebenszyklusdaten lassen sich zirkuläre Strategien nicht umsetzen: Ein Recyclingbetrieb kann die Rückgewinnbarkeit von Materialien ohne Angaben zur Zusammensetzung nicht beurteilen, ein Reparaturbetrieb kann ohne Wartungshistorie nicht tätig werden, und ein Digital Product Passport (DPP) kann ohne überprüfbare Herkunfts- und Prozessinformationen nicht befüllt werden.

In der Praxis sind solche Informationen häufig über verschiedene Organisationen und Systeme verteilt. Relevante Daten können bei Herstellern, Zulieferern, Dienstleistern, Recyclingbetrieben oder Behörden liegen. Zirkuläre Strategien wie Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing, Recycling und Digital Product Passports hängen daher davon ab, dass Daten über Organisationsgrenzen hinweg ausgetauscht werden können [3], [5]. Zugleich muss dieser Austausch die Datenhoheit, die Vertraulichkeit und regulatorische Vorgaben wahren. Aktuelle Studien zeigen, dass fehlende oder nicht zugängliche Lebenszyklusdaten nach wie vor ein wesentliches Hindernis für die Umsetzung der CE darstellen. Serna-Guerrero et al. zeigen, dass unvollständige und fragmentierte Daten eine effiziente Materialrückgewinnung und die Recyclingprozesse in industriellen Ökosystemen einschränken [2]. Ähnliche Beobachtungen finden sich in Studien zu CE-Governance und Interoperabilität, in denen das Fehlen einer gemeinsamen digitalen Infrastruktur die Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten erschwert [6]. Der Bedarf an organisationsübergreifendem Datenaustausch ergibt sich somit unmittelbar daraus, dass die für zirkuläre Entscheidungen benötigten Daten von einem Akteur erzeugt, aber von einem anderen genutzt werden – genau diese Lücke soll ein CE-Dataspace schließen.

Dataspaces begegnen dieser Herausforderung, indem sie einen kontrollierten Datenaustausch zwischen unabhängigen Akteuren ermöglichen. Anders als zentrale Plattformen bieten Dataspaces eine föderierte Umgebung, in der die Teilnehmenden Daten austauschen und zugleich die Kontrolle über Zugriffs- und Nutzungsbedingungen behalten [3], [4]. Im CE-Kontext ist dies besonders relevant, da Lebenszyklusdaten häufig sensibel und verteilt sind und von mehreren Beteiligten in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus benötigt werden. Im DACE-Projekt wird ein Solid-basierter Dataspace entwickelt und bereitgestellt, um den Austausch CE-bezogener Daten zu unterstützen. Solid wurde ausgewählt, weil es bereits eine dezentrale, webbasierte Infrastruktur zum Speichern und Teilen von Daten über persönliche oder organisationale Data Stores bereitstellt [7]. Die Unterstützung von Linked-Data-Technologien, Web-Identitäten und feingranularer Zugriffskontrolle macht Solid für praxisnahe CE-Szenarien des Datenaustauschs geeignet [7], [11]. Zugleich muss die Umsetzung im Hinblick auf die Anforderungen und Grenzen des CE-Datenaustauschs betrachtet werden, insbesondere hinsichtlich Governance, Auffindbarkeit, Interoperabilität und Usage Control.



1.1 Umfang des Berichts

Ziel dieses Berichts ist es, den konzeptionellen Hintergrund, die Technologieauswahl und die Umsetzung eines Solid-basierten Dataspace für Daten der Circular Economy im DACE-Projekt zu dokumentieren. Der Bericht schlägt keine neue Dataspace-Architektur vor. Vielmehr untersucht er bestehende Dataspace-Konzepte und -Komponenten und erläutert, warum Solid als geeignete Lösung für die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Projekts ausgewählt wurde. Zunächst werden die wesentlichen Prinzipien von Dataspaces eingeführt und relevante Technologien wie Solid, IDS-basierte Architekturen, Gaia-X, der Eclipse Dataspace Connector, FIWARE und Ocean Protocol behandelt. Anschließend werden die Anforderungen des CE-Datenaustauschs analysiert, darunter die Rückverfolgbarkeit über den Lebenszyklus, semantische Interoperabilität, selektiver Datenzugriff und die Unterstützung von Digital Product Passports [4], [5], [6]. Auf dieser Grundlage beschreibt der Bericht die Entwurfsentscheidungen, die Struktur der Bereitstellung, die Dienste und die Konfigurationen des Solid-basierten DACE-Dataspace. Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Zunächst werden die Grundelemente und Kernkomponenten eines Dataspace definiert (Kapitel 2). Danach werden relevante Dataspace-Technologien und -Architekturen allgemein beschrieben (Kapitel 3). Darauf aufbauend werden die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen des CE-Datenaustauschs analysiert (Kapitel 4). Abschließend wird der gewählte DACE-Ansatz vorgestellt und begründet, indem die verfügbaren Technologien anhand dieser CE-Anforderungen bewertet werden (Kapitel 5).



2 Grundlagen von Dataspaces

2.1 Konzept und Kernkomponenten

Dataspaces sind dezentrale Infrastrukturen, die einen kontrollierten Datenaustausch zwischen unabhängigen Teilnehmenden ermöglichen [3], [8]. Anders als zentrale Plattformen verlangen Dataspaces nicht, dass alle Daten in einem einzigen Repository gespeichert werden. Die Daten verbleiben vielmehr in der Kontrolle des jeweiligen Anbieters und werden über gemeinsame Standards, Schnittstellen und Governance-Regeln zugänglich gemacht [4], [8]. Dieser Ansatz unterstützt die Interoperabilität über Organisationsgrenzen hinweg, wahrt zugleich die Datensouveränität und verringert die Abhängigkeit von zentralen Plattformbetreibern.

Ein zentrales Ziel von Dataspaces ist es, vertrauenswürdige Umgebungen für den Datenaustausch zu schaffen. Dazu kombinieren Dataspaces technische und organisatorische Mechanismen für Identitätsmanagement, Zugriffskontrolle, semantische Interoperabilität und Policy-Durchsetzung [8]. Die Umsetzungen unterscheiden sich je nach gewählter Architektur; die meisten Dataspace-Ansätze beruhen jedoch auf einer Reihe gemeinsamer Komponenten [8].

Zu den Kernkomponenten eines Dataspace gehören, wie in Abbildung 1 dargestellt, typischerweise [8]:

- **Connectors** für Datenaustausch und Kommunikation
- **Identity providers** für Authentifizierung und Überprüfung der Teilnehmenden
- **Metadatenkataloge** zum Registrieren und Auffinden von Datenangeboten
- **Policy- und Zugriffskontrollmechanismen** zur Verwaltung von Berechtigungen und Nutzungsbedingungen

Connectors bilden die Schnittstelle zwischen den Teilnehmenden und ermöglichen eine sichere Kommunikation zwischen Systemen. Identitätsdienste stellen sicher, dass nur verifizierte Entitäten auf Ressourcen innerhalb des Dataspace zugreifen können. Metadatenkataloge enthalten Beschreibungen der verfügbaren Datensätze und Dienste und verbessern damit Auffindbarkeit und Interoperabilität. Policy-Mechanismen legen fest, wie auf Daten zugegriffen werden darf und unter welchen Bedingungen sie genutzt werden dürfen [8].

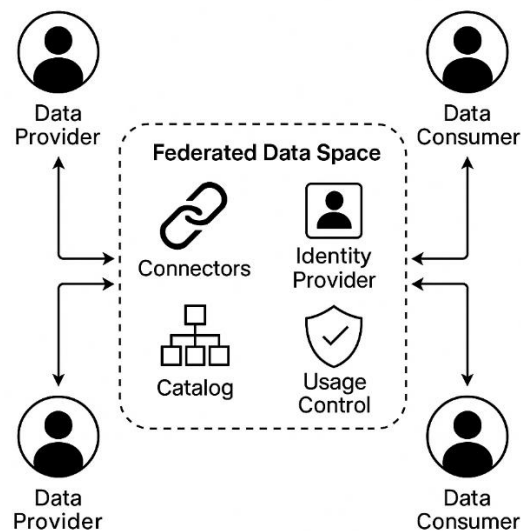


Abbildung 1. Komponenten eines Dataspace

Neben der technischen Interoperabilität setzen Dataspaces häufig auf semantische Technologien, um eine einheitliche Interpretation der geteilten Daten sicherzustellen. Gemeinsame Vokabulare und maschinenlesbare Metadaten unterstützen die Integration zwischen heterogenen Systemen und Domänen. Dieser Aspekt ist in Szenarien der Circular Economy besonders relevant, da Lebenszyklusinformationen, Materialdaten und Prozessbeschreibungen von mehreren Beteiligten und aus unterschiedlichen Informationssystemen stammen [5].

2.2 Governance, Datenschutz und Sicherheit

Da Dataspaces über Organisationsgrenzen hinweg betrieben werden, sind Governance, Datenschutz und Sicherheit zentrale Anforderungen. Die Teilnehmenden müssen Daten austauschen können, ohne die Kontrolle über sensible oder geschützte Informationen zu verlieren. Dataspaces benötigen daher Mechanismen, die eine vertrauenswürdige Zusammenarbeit ermöglichen und zugleich die Einhaltung organisatorischer und regulatorischer Vorgaben sicherstellen [6], [8].

Datensouveränität ist eines der Leitprinzipien von Dataspaces [3], [8]. Sie bezeichnet die Fähigkeit von Datenanbietern, den Zugriff auf ihre Daten zu steuern und die Bedingungen festzulegen, unter denen die Daten geteilt oder verarbeitet werden dürfen. Dies ist in CE-Umgebungen besonders wichtig, da Lebenszyklusdaten vertrauliche Geschäftsinformationen, Lieferantenbeziehungen oder compliance-relevante Produktdetails enthalten können [2], [5].

Sicherheit in Dataspaces umfasst Authentifizierung, Autorisierung, sichere Kommunikation und den Schutz vor unbefugtem Zugriff. Vertrauenswürdiges Identitätsmanagement und policy-basierte Zugriffskontrolle sind daher wesentliche Bestandteile der meisten Dataspace-Architekturen [8]. Darüber hinaus unterstützen viele Ansätze Protokollierungs- und Auditing-Mechanismen, um die Nachvollziehbarkeit und Rechenschaftsfähigkeit beim Datenaustausch zu verbessern [8].

Governance legt die Regeln und Verantwortlichkeiten innerhalb eines Dataspace fest. Dazu gehören das Onboarding von Teilnehmenden, die Identitätsprüfung, die semantische Abstimmung



Teil 1: Theorie und Einführung

und das Compliance-Management [6], [8]. Governance-Rahmenwerke fördern zudem die Interoperabilität zwischen Organisationen, indem sie gemeinsame Regeln für Datenaustausch und Service-Integration festlegen [3], [4].

Trotz dieser Mechanismen bestehen weiterhin mehrere Herausforderungen. Organisationen zögern mitunter, Daten zu teilen, weil sie Bedenken hinsichtlich Vertraulichkeit, rechtlicher Haftung oder Wettbewerbsnachteilen haben [2], [6]. Heterogene Datenmodelle und fehlende semantische Standards können die Interoperabilität über Domänen hinweg erschweren [5], [6]. Eine weitere Herausforderung ist die Policy-Durchsetzung, die sicherstellt, dass geteilte Daten nur für erlaubte Zwecke verwendet werden; Datenanbieter müssen Einschränkungen wie den zulässigen Zweck, die Speicherdauer oder Beschränkungen der Weitergabe an Dritte festlegen können. Die Forschung zeigt, dass Governance über technische Berechtigungen hinausgehen und vertragliche sowie organisatorische Vereinbarungen einbeziehen muss [3], [6]. Wie sich diese allgemeinen Herausforderungen in der Circular Economy konkret zeigen, wird in Kapitel 4 behandelt.



3 Dataspace-Technologien und -Architekturen

3.1 Solid

Solid (Social Linked Data) ist ein dezentraler Ansatz des Datenmanagements, der von Tim Berners-Lee vorgeschlagen wurde, um Datenhoheit und Interoperabilität im Web zu verbessern [7]. Statt Daten auf zentralen Plattformen zu speichern, ermöglicht Solid es Nutzenden und Organisationen, ihre Informationen in persönlichen oder organisationalen Datenspeichern – den sogenannten Pods – zu verwalten. Diese Architektur erlaubt es Datenanbietern, die Kontrolle über ihre Daten zu behalten und Ressourcen gezielt mit externen Anwendungen oder Teilnehmenden zu teilen [7], [11].

Solid basiert auf gängigen Web-Technologien und den Prinzipien des Semantic Web. Daten sollen mit RDF- und Linked-Data-Formaten dargestellt werden, die die semantische Interoperabilität zwischen verteilten Systemen unterstützen [7]. Dies ist in Szenarien der Circular Economy besonders relevant, in denen heterogene Lebenszyklusdaten mehrerer Beteiligter integriert und einheitlich interpretiert werden müssen [5].

Zu den Hauptkomponenten der Solid-Architektur gehören:

- **Solid Pods** für die dezentrale Datenspeicherung
- **WebIDs zur Identifikation der Teilnehmenden**
- **Web Access Control (WAC)** bzw. Access Control Policies (ACP) für die Rechteverwaltung
- **Linked-Data-Technologien** für die semantische Interoperabilität

Die Authentifizierung erfolgt in Solid üblicherweise über OpenID Connect (OIDC), während die Autorisierung über Zugriffsrichtlinien auf Ressourcenebene geregelt wird [7]. Dies ermöglicht eine feingranulare Steuerung des Datenzugriffs und unterstützt das selektive Teilen von Daten zwischen Organisationen und Nutzenden. Abbildung 2 zeigt die wesentlichen Architekturkomponenten und Interaktionen im Solid-Ökosystem.

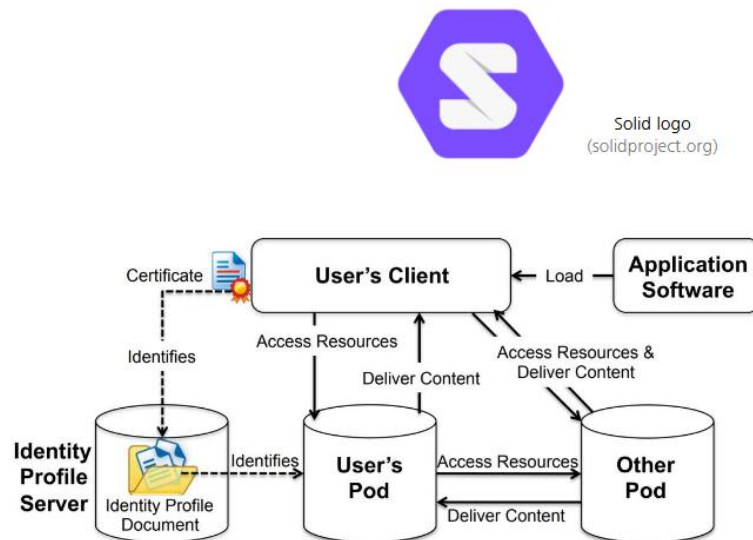


Abbildung 2. Solid-Architektur

Eine der wichtigsten Stärken von Solid ist die schlanke und modulare Architektur. Da Solid webbasiert und quelloffen ist, lässt es sich vergleichsweise leicht in bestehende Systeme und Forschungsumgebungen integrieren. Zudem passt die dezentrale Struktur gut zu CE-Szenarien mit verteilten Beteiligten und organisationsübergreifendem Datenaustausch. Zugleich weist Solid auch Grenzen auf. Anders als IDS-basierte Ansätze bietet Solid von Haus aus keine durchsetzbare Usage Control, kein vertragliches Policy-Management und keine integrierten Auditing-Mechanismen [8]. Governance und Compliance hängen daher häufig von externen Diensten oder organisatorischen Vereinbarungen ab. Darüber hinaus ist die industrielle Verbreitung Solid-basierter Infrastrukturen im Vergleich zu etablierteren, unternehmensorientierten Dataspace-Lösungen noch begrenzt.

3.2 IDS-basierte Architekturen

Die Initiative International Data Spaces (IDS) definiert eine Referenzarchitektur für den sicheren und souveränen Datenaustausch in industriellen Umgebungen [8]. Im Vergleich zu web-nativen Ansätzen wie Solid legt IDS einen stärkeren Schwerpunkt auf Governance, Vertrauen, Zertifizierung und Usage Control. Die IDS-Architektur ist vor allem für Business-to-Business-Szenarien ausgelegt, die formale Compliance und Policy-Durchsetzung erfordern.

Die IDS-Referenzarchitektur umfasst mehrere Kernkomponenten:

- **IDS Connectors** für den sicheren Datenaustausch
- **Dynamic Attribute Provisioning Service (DAPS)** zur Identitätsprüfung
- **Metadata Brokers** zum Auffinden von Datensätzen
- **Clearing Houses** zur Protokollierung und Prüfung von Transaktionen
- **Policy-Enforcement-Dienste** für die Usage Control

Ein zentrales Konzept in IDS ist die Datennutzungskontrolle (Usage Control). Im Unterschied zur klassischen Zugriffskontrolle legt die Nutzungskontrolle fest, wie Daten nach der Gewährung des



Zugriffs verarbeitet werden dürfen. Policies können die Speicherdauer, die Weitergabe oder den zulässigen Verwendungszweck einschränken [8]. Diese Fähigkeit ist besonders in industriellen Ökosystemen wichtig, in denen der Datenaustausch mit vertraglichen Pflichten oder sensiblen Geschäftsinformationen verbunden ist.

IDS definiert außerdem Governance- und Zertifizierungsmechanismen, um Vertrauen zwischen den Teilnehmenden herzustellen. Organisationen und Softwarekomponenten können nach IDS-Anforderungen zertifiziert werden, was Interoperabilität und Compliance innerhalb des Ökosystems verbessert [8]. Diese Eigenschaften machen IDS-basierte Architekturen für regulierte und industrielle Umgebungen gut geeignet. Die zusätzlichen Governance- und Sicherheitsmechanismen erhöhen jedoch auch die architektonische Komplexität und den Aufwand für die Bereitstellung. Im Vergleich zu Solid sind IDS-basierte Systeme in der Regel weniger schlank und erfordern mehr Infrastruktur und operativen Betrieb.

3.3 Weitere Technologien

Neben Solid und IDS tragen weitere Technologien zum größeren Dataspace-Ökosystem bei. Dabei ist zu beachten, dass diese Technologien keine austauschbaren Alternativen für dasselbe Problem sind. Sie wurden vielmehr für unterschiedliche Zwecke und Anwendungsbereiche entwickelt:

Gaia-X ist eine europäische Initiative mit dem Ziel, eine föderierte und souveräne Dateninfrastruktur für den sektorübergreifenden Datenaustausch aufzubauen. Gaia-X stellt keine vollständige technische Plattform bereit, sondern definiert vor allem Governance-Prinzipien, Interoperabilitätsanforderungen und Policy-Rahmenwerke für die teilnehmenden Systeme [4].

Der Eclipse Dataspace Connector (EDC) ist ein open-source Connector-Framework, das an den Konzepten von IDS und Gaia-X ausgerichtet ist. Er unterstützt den sicheren Datenaustausch zwischen Organisationen und wird in industriellen Data-Sharing-Umgebungen breit eingesetzt.

FIWARE ist eine quelloffene Plattform, die Middleware und APIs für kontextbezogenes Datenmanagement bereitstellt. Ergänzt wird sie durch die Initiative Smart Data Models, einen offenen Katalog harmonisierter Datenmodelle für Bereiche wie Smart City, Wasser und Abfallwirtschaft. Diese gemeinsamen Modelle unterstützen die semantische Interoperabilität und verringern den Aufwand für die Abstimmung von Daten zwischen den Beteiligten. FIWARE wird häufig in Smart-City- und Public-Sector-Anwendungen eingesetzt.

Ocean Protocol ist ein blockchainbasiertes Framework für dezentralen Datenaustausch und die Monetarisierung von Daten. Es nutzt tokenbasierte Mechanismen, um vertrauenswürdige Transaktionen und Datenmarktplätze zu unterstützen.

IDS adressiert den geregelten industriellen Business-to-Business-Austausch, Solid die dezentrale, web-native Datenhoheit; Gaia-X liefert ein Governance- und Interoperabilitäts-Framework statt einer Implementierung, EDC eine Connector-Implementierung, FIWARE konzentriert sich auf kontextbezogenes Datenmanagement in Echtzeit und Ocean Protocol auf die Kommerzialisierung von Daten. Sie lassen sich daher besser als komplementäre Bausteine mit unterschiedlichen Schwerpunkten verstehen denn als konkurrierende Alternativen. Diese Technologien spiegeln unterschiedliche Prioritäten in der Dataspace-Landschaft wider. Einige Ansätze stellen Governance und Compliance in den Vordergrund, andere betonen Dezentralisierung, Interoperabilität oder ökonomische Anreize. Folglich deckt keine einzelne Lösung alle technischen und organisatorischen Anforderungen des CE-Datenaustauschs vollständig ab.



3.4 Vergleichende Analyse und Grenzen

Die betrachteten Technologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich Architektur, Governance, Bereitstellungsaufwand und Unterstützung der Datensouveränität. IDS-basierte Ansätze bieten starke Governance- und Usage-Control-Mechanismen, bringen jedoch eine höhere betriebliche Komplexität und einen größeren Infrastrukturaufwand mit sich [8]. Solid bietet demgegenüber eine schlanke und dezentrale Architektur mit starker Unterstützung von Web-Standards und flexibler Bereitstellung [7]. Es fehlen jedoch mehrere unternehmensorientierte Governance-Funktionen, die in IDS-Umgebungen verfügbar sind. Abbildung 3 stellt die architektonischen Unterschiede zwischen dem Solid- und dem IDS-basierten Ansatz gegenüber.

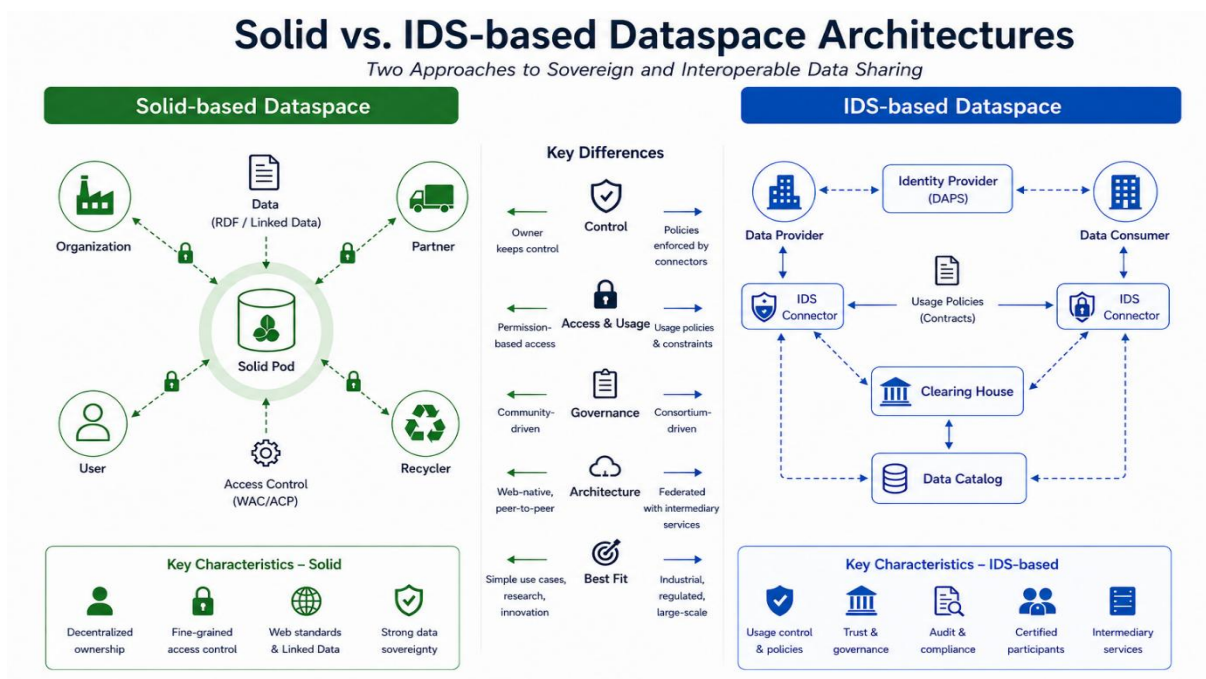


Abbildung 3. Vergleich der Solid- und der IDS-basierten Dataspace-Architektur

Gaia-X wirkt vor allem als Governance- und Interoperabilitäts-Framework und nicht als eigenständige Implementierung [4]. Technologien wie EDC erweitern die Konzepte von IDS und Gaia-X um praktische Connector-Implementierungen für den industriellen Datenaustausch. FIWARE und Ocean Protocol adressieren spezialisiertere Bereiche, darunter Kontextmanagement und dezentrale Datenmarktplätze.

Diese Unterschiede führen dazu, dass die Eignung der jeweiligen Technologie vom konkreten Anwendungskontext abhängt. Unter den verfügbaren Ansätzen liegt der Fokus dieser Arbeit auf Solid und IDS, da diese die am weitesten verbreiteten Technologien für Dataspaces darstellen. Im Bereich IDS wird der Eclipse Dataspace Connector als Beispiel für eine der erfolgreichsten Implementierungen gemäß den IDS-Spezifikationen betrachtet. Die Bewertung dieser Technologien anhand der Anforderungen des Datenaustauschs in der Circular Economy sowie die daraus resultierende Auswahl für das DACE-Projekt werden in Kapitel 5 dargestellt, nachdem die CE-Anforderungen in Kapitel 4 eingeführt wurden. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Merkmale, Stärken und Grenzen der vorgestellten Dataspace-Technologien zusammen und verdeutlicht die Zielkonflikte zwischen dezentraler Flexibilität und governance-orientierten Architekturen.



Tabelle 1: Vergleichender Überblick über Dataspace-Technologien

Technologie	Wesentliche Merkmale	Stärken	Grenzen
IDS-basierte Architekturen	Föderierte industrielle Dataspace-Architektur mit Usage Control und Zertifizierung	Starke Governance, Policy-Durchsetzung, Auditing	Hohe Komplexität und hoher Bereitstellungsaufwand
Solid	Dezentrale, webbasierte Datenarchitektur mit Pods und Linked Data	Schlank, flexibel, starke Datenhoheit	Begrenzte native Usage Control und Governance
Eclipse Dataspace Connector	Open-source Connector-Framework für den sicheren Datenaustausch	Praxisnahe industrielle Integration	Abhängig von externen Governance-Rahmenwerken
Gaia-X	Föderiertes Governance- und Interoperabilitäts-Framework	Sektorübergreifende Interoperabilität und Souveränitätskonzepte	Keine eigenständige technische Implementierung
FIWARE	Middleware-Plattform für kontextbezogenes Datenmanagement	Echtzeit-Integration und offene APIs	Weniger Fokus auf Datensouveränität
Ocean Protocol	Blockchainbasierter dezentraler Datenmarktplatz	Monetarisierung von Daten und dezentraler Austausch	Zusätzliche Komplexität und geringe Verbreitung in der CE



4 Dataspace in der Circular Economy

4.1 CE-Anforderungen

Prozesse der Circular Economy hängen von der Verfügbarkeit und dem Austausch verlässlicher Lebenszyklusdaten über Organisationsgrenzen hinweg ab [2], [5]. Produkte, Materialien und Komponenten durchlaufen in ihrem Lebenszyklus mehrere Phasen und Beteiligte, darunter Hersteller, Zulieferer, Dienstleister, Recyclingbetriebe und Behörden. CE-Dataspaces müssen daher die Zusammenarbeit zwischen heterogenen Systemen unterstützen und zugleich Datensouveränität und Vertraulichkeit wahren. Eine wichtige Anforderung ist die Rückverfolgbarkeit über den **Lebenszyklus (CE-R01)**. Die Beteiligten müssen auf Informationen zu Produktzusammensetzung, Herkunft, Wartungshistorie, Umweltwirkung und End-of-Life-Prozessen zugreifen können [5]. Diese Informationen sind für Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing, Recycling und die Nachhaltigkeitsbewertung erforderlich. Zudem stützen sich aktuelle Regulierungen und Initiativen zunehmend auf DPPs, die interoperable und dauerhaft zugängliche Lebenszyklusinformationen voraussetzen [4], [6].

Die **semantische Interoperabilität (CE-R02)** ist eine weitere zentrale Anforderung. CE-bezogene Daten stammen häufig aus unterschiedlichen Domänen und Informationssystemen, die inkompatible Datenstrukturen oder Begrifflichkeiten verwenden. Gemeinsame Vokabulare und maschinenlesbare Metadaten sind daher notwendig, um eine einheitliche Interpretation und Integration der Daten über die Beteiligten hinweg sicherzustellen [5], [6]. Auch **der selektive und kontrollierte Datenaustausch (CE-R03)** ist in CE-Umgebungen unverzichtbar. Organisationen müssen unter Umständen Nachhaltigkeitskennzahlen, Materialinformationen oder Prozessdaten teilen und zugleich vertrauliches Geschäftswissen und Lieferantenbeziehungen schützen [2]. Dataspaces müssen daher eine feingranulare Zugriffskontrolle und Governance-Mechanismen bieten, mit denen die Teilnehmenden festlegen können, wie und unter welchen Bedingungen auf Daten zugegriffen werden darf [6], [8].

Darüber hinaus sollten CE-Dataspaces eine verteilte und **sektorübergreifende Zusammenarbeit unterstützen (CE-R04)**. Zirkuläre Wertschöpfungsketten erstrecken sich häufig über mehrere Branchen und Organisationsstrukturen. Infrastrukturen für den Datenaustausch müssen daher flexibel und interoperabel bleiben und zugleich unterschiedliche Governance-Modelle und regulatorische Anforderungen unterstützen [3], [4].

4.2 Herausforderungen und Grenzen

Trotz der Fortschritte der letzten Jahre begrenzen mehrere technische und organisatorische Herausforderungen weiterhin den Einsatz von Dataspaces in CE-Szenarien. Während Kapitel 2 Herausforderungen behandelt hat, die für Dataspaces allgemein gelten, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die Faktoren, die diese Herausforderungen in zirkulären Wertschöpfungsketten verschärfen: die Zahl unabhängiger Akteure, die Länge des Produktlebenszyklus und der regulatorische Rahmen.

Eine wesentliche Herausforderung ist die Heterogenität von Datenquellen und Standards. Lebenszyklusdaten liegen häufig in isolierten Systemen mit inkompatiblen Formaten vor, was die Interoperabilität und die semantische Integration zwischen den Beteiligten erschwert [5], [6].



Auch Datenqualität und Vollständigkeit bleiben ein erhebliches Problem. Fehlende, inkonsistente oder veraltete Informationen können die Verlässlichkeit von Lebenszyklusbewertungen mindern und die Rückverfolgbarkeit entlang der Lieferketten schwächen [2]. In der Praxis erheben Organisationen Daten mit unterschiedlichen Methoden oder in unterschiedlicher Detailtiefe, was den Austausch und die Interpretation zusätzlich erschwert.

Eine weitere Herausforderung betrifft Vertrauen und Governance. In CE-Kontexten sind gerade jene Daten, die andere am dringendsten benötigen – etwa Materialzusammensetzung, Lieferantenidentität oder Ausfall- und Rücklaufquoten –, häufig dieselben Daten, die den Wettbewerbsvorteil ausmachen. Anders als beim kundenbezogenen Datenaustausch ist die anfragende Partei oft ein Recycling- oder Remanufacturing-Betrieb oder ein direkter Wettbewerber, was das wahrgenommene Risiko der Offenlegung erhöht [2], [6]. Die Zurückhaltung beim Teilen von Daten ist daher in industriellen CE-Ökosystemen mit mehreren unabhängigen Akteuren in gemeinsamen Wertschöpfungsketten besonders ausgeprägt.

Auch die Policy-Durchsetzung und die Usage Control lassen sich in CE-Umgebungen nur schwer konsistent umsetzen. Produktlebenszyklen erstrecken sich über Jahre oder Jahrzehnte, sodass Daten noch lange nach Abschluss der ursprünglichen Vereinbarung zugänglich und geregelt bleiben müssen – oft auch für Akteure, die an der ursprünglichen Transaktion nicht beteiligt waren. Die Durchsetzung von Nutzungsbeschränkungen über derart lange Zeiträume und wechselnde Teilnehmerkonstellationen ist weiterhin ein offenes Problem [3], [8] und wird durch grenzüberschreitende regulatorische Anforderungen zusätzlich erschwert.

Zudem befinden sich Governance-Rahmenwerke für CE-Dataspaces noch in der Entwicklung. Die derzeitigen Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich Interoperabilitätsmodellen, Identitätsmanagement, semantischen Standards und Compliance-Mechanismen. Viele CE-Dataspaces stehen daher weiterhin vor Schwierigkeiten bei Skalierbarkeit, plattformübergreifender Integration und langfristiger Governance [4], [6]. Diese Einschränkungen zeigen, dass keine bestehende Dataspace-Technologie alle CE-Anforderungen vollständig erfüllt. Die verschiedenen Ansätze haben unterschiedliche Stärken, und praktische Umsetzungen erfordern häufig Abwägungen zwischen Flexibilität, Governance, Interoperabilität und betrieblicher Komplexität.



5 DACE-Dataspace-Ansatz

5.1 Auswahl des Solid-basierten Ansatzes

Das DACE-Projekt benötigte eine Umgebung für den Datenaustausch, die dezentrale Zusammenarbeit, semantische Interoperabilität und einen kontrollierten Zugriff auf CE-bezogene Daten über Organisationsgrenzen hinweg unterstützt. Zugleich musste die gewählte Lösung flexibel genug für Forschungs- und Prototyping-Arbeiten bleiben und praktische CE-Anwendungsfälle wie den Austausch von Lebenszyklusdaten und Digital Product Passports unterstützen. Auf Grundlage der zuvor behandelten Technologien und Anforderungen wurde Solid als primärer Ansatz für den DACE-Dataspace ausgewählt. Ein wichtiger Grund für diese Entscheidung war die dezentrale und web-native Architektur von Solid [7]. Anders als zentrale Datenplattformen erlaubt Solid es Organisationen, die Kontrolle über ihre eigenen Daten zu behalten und Ressourcen über standardisierte Web-Technologien gezielt mit externen Beteiligten zu teilen. Dies passt gut zu den Anforderungen von CE-Umgebungen, in denen Lebenszyklusdaten typischerweise über mehrere Akteure und Systeme verteilt sind. Ein weiterer wichtiger Faktor war die Unterstützung von Semantic-Web- und Linked-Data-Technologien durch Solid [7], [11]. CE-Szenarien erfordern häufig die Integration heterogener Datensätze aus unterschiedlichen Quellen, Domänen und Lebenszyklusphasen. Eine RDF-basierte Datenrepräsentation und maschinenlesbare Metadaten bieten daher wichtige Vorteile für Interoperabilität und semantische Integration [5].

Im Vergleich zu IDS-basierten Architekturen bietet Solid zudem einen schlankeren und modulareren Ansatz. IDS stellt starke Governance- und Usage-Control-Funktionen bereit, bringt aber auch eine höhere Bereitstellungskomplexität und einen größeren Betriebsaufwand mit sich [8]. Darüber hinaus konnte in der Evaluierungsphase des Projekts keine vollständig ausgereifte quelloffene IDS-basierte Lösung identifiziert werden, die alle erforderlichen Komponenten und Funktionen in einfach einsetzbarer Form bereitstellt. Bestehende Implementierungen zeigten häufig Einschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Connectors, der Interoperabilität zwischen den Komponenten, der Konfigurationskomplexität oder der Abhängigkeit von teilweise proprietären Ökosystemen. Diese Einschränkungen erschwerten die praktische Bereitstellung und Erprobung im Rahmen des DACE-Projekts.

Für das DACE-Projekt bestand das vorrangige Ziel nicht darin, einen vollständig geregelten industriellen Dataspace aufzubauen, sondern eine prototypische, flexible und interoperable Umgebung für den CE-bezogenen Datenaustausch und für Experimente bereitzustellen. In diesem Kontext bot Solid ein geeignetes Gleichgewicht zwischen Dezentralität, Interoperabilität, Einfachheit und Erweiterbarkeit. Zugleich bringt die Wahl von Solid mehrere Einschränkungen mit sich. Native Usage-Control-Mechanismen, die vertragliche Policy-Durchsetzung und integriertes Auditing sind weniger ausgereift als in IDS-basierten Ansätzen [8]. Governance- und Compliance-Aspekte können daher in größeren industriellen Umgebungen zusätzliche externe Mechanismen erfordern. Dennoch wurde Solid für die Anforderungen und den Umfang des DACE-Projekts als hinreichend ausgereift und flexibel eingeschätzt. Der gewählte Ansatz stellt eine praktische Abwägung zwischen weitreichenden Governance-Funktionen und architektonischer Einfachheit dar. Statt ein vollumfängliches industrielles Dataspace-Framework umzusetzen, konzentriert sich das DACE-Projekt darauf, eine dezentrale und interoperable Grundlage für den CE-bezogenen Datenaustausch auf Basis offener Web-Technologien zu schaffen.



6 Literaturverzeichnis

- [1] „Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile“, Themen | Europäisches Parlament. Zugriffen: 5. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>
- [2] Serna-Guerrero, R., Ikonen, S., Kallela, O. and Hakanen, E., 2022. Overcoming data gaps for an efficient circular economy: A case study on the battery materials ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 374, p.133984.
- [3] Rilling, L., Schneider, A. and Castelli, N., 2023. Towards Dataspaces for circular economy and green business value networks. In *EnvirolInfo 2023* (pp. 57-68). Gesellschaft für Informatik eV.
- [4] Steiner, B. and Münch, C., 2024. Leveraging digital dataspaces in purchasing and supply management: Paving the way to the circular economy exemplified by Catena-X. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 30(4), p.100951.
- [5] Pomp, A., Jansen, M., Berg, H. and Meisen, T., 2023, April. SPACE_DS: towards a circular economy dataspace. In *Companion Proceedings of the ACM Web Conference 2023* (pp. 1500-1501).
- [6] Hofman, W., Rukanova, B., Tan, Y.H., Bharosa, N., Ubacht, J. and Rietveld, E., 2024, March. Digital Infrastructures for Compliance Monitoring of Circular Economy: Requirements for Interoperable Dataspaces. In *Future of Information and Communication Conference* (pp. 332-351). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [7] Sambra, A. V., Mansour, E., Hawke, S., Zereba, M., Greco, N., Ghanem, A., ... & Berners-Lee, T. (2016). Solid: a platform for decentralized social applications based on linked data.
- [8] International Dataspaces Association (IDSA), “IDS Reference Architecture Model,” Version 4.0, 2020. [Online]. Available: <https://internationaldataspaces.org/>
- [9] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- [10] Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662–1687.
- [11] Mansour, E., Sambra, A. V., Hawke, S., Zereba, M., Greco, N., Ghanem, A., & Berners-Lee, T. (2016). A demonstration of the Solid platform for social web applications. *Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web*, 223–226.

