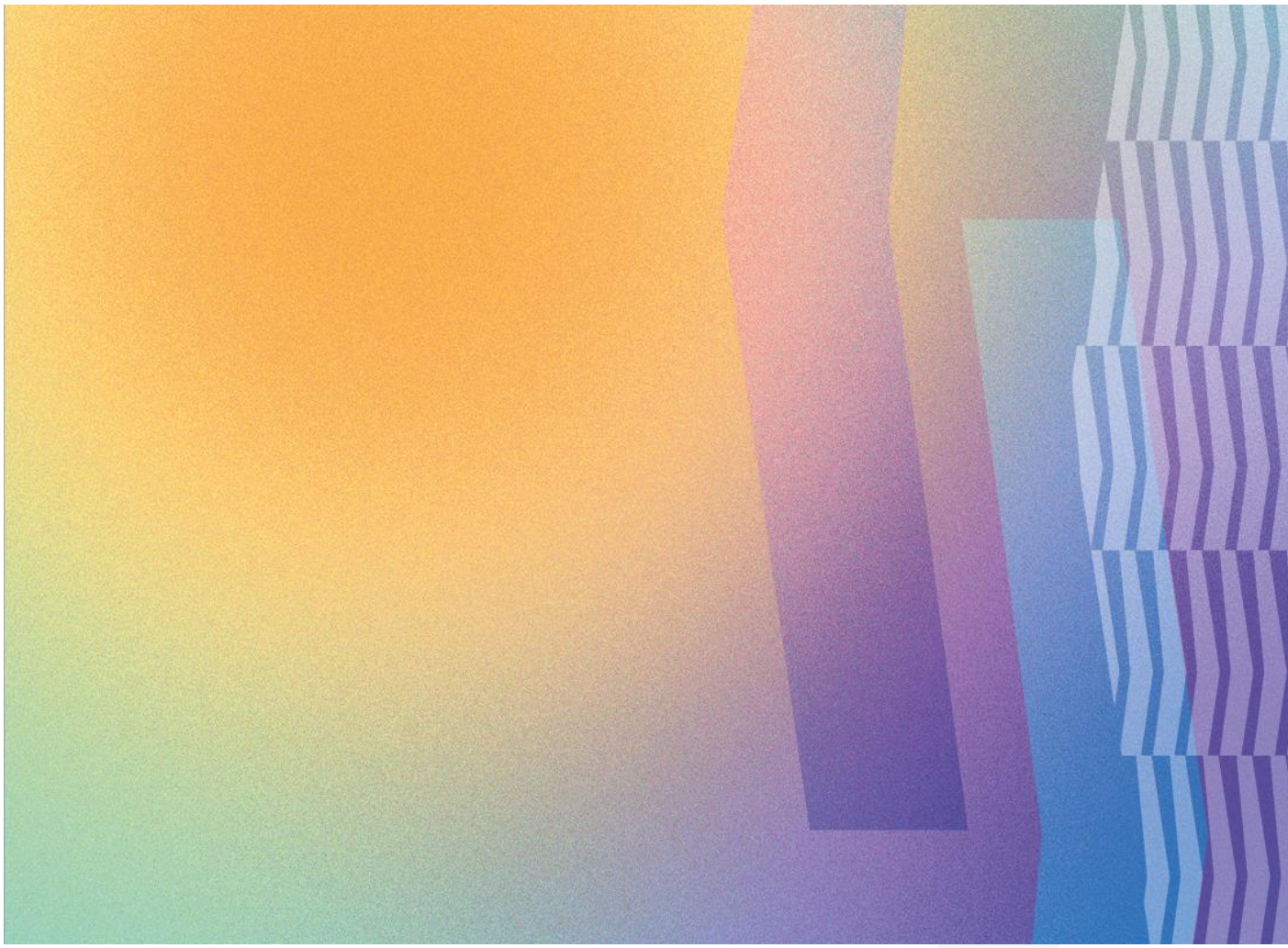
Technologieprogramm Edge Datenwirtschaft
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz



DATENWIRTSCHAFT UND EDGE-COMPUTING

Potenziale, Herausforderungen und Handlungsempfehlungen für Unternehmen

Impressum

Die Kurzstudie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm „Edge Datenwirtschaft“ erstellt.

Autoren

Nils Jahnke
Nicolas Niehoff

Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST
Dortmund

Herausgeber

Peter Gabriel
Dr. Nicole Wittenbrink

Begleitforschung Edge Datenwirtschaft
Institut für Innovation und Technik (iit)
in der VDI / VDE Innovation + Technik GmbH
Berlin

Datum

Januar 2024

Layout

LHLK Agentur für Kommunikation

Executive Summary

Der Einsatz von Edge-Computing-Technologien bietet Unternehmen große Potenziale für die Prozessoptimierung sowie die Entwicklung neuer Produkte und innovativer Geschäftsmodelle. Die mit Edge-Computing verbundene Verlagerung von Speicher- und Rechenkapazitäten nahe dem Ort der Datenerzeugung (der Edge) ermöglicht aus technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Perspektive neuartige Anwendungsfälle in verschiedensten Domänen. Insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) mangelt es jedoch noch an Kenntnis über Edge-Computing und dessen praktische Einsatzmöglichkeiten zur Entwicklung und Implementierung von Anwendungsfällen. Ein Umstand, der die Realisierung datenwirtschaftlicher Wertschöpfung derzeit noch verhindert.

Ziel dieser Studie ist es, Unternehmen, insbesondere KMU, bei der Entwicklung eigener Edge-Computing-Anwendungsfälle zu unterstützen. Ausgehend von Fragestellungen hinsichtlich der Konzeptualisierung von Edge-Computing und Datenwirtschaft, der möglichen Gestaltung von Edge-Computing-Anwendungsfällen und den in diesem Rahmen auftretenden Herausforderungen und Potenzialen für Early-Adopters liefert diese Kurzstudie eine Orientierungshilfe für Entscheiderinnen und Entscheider, Entwicklungsmanagerinnen und Entwicklungsmanager und alle weiteren Interessierten, die sich derzeit oder zukünftig mit dem Einsatz von Edge-Computing zur Generierung von unternehmerischen Mehrwerten befassen. Die Studie liefert darüber hinaus Handlungsempfehlungen zur Entwicklung eigener Edge-Computing-Anwendungen in Unternehmen.

Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf einer Analyse von Edge-Computing-Anwendungsfällen, die im Rahmen der zehn Projekte des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Technologieprogramms Edge Datenwirtschaft zum Veröffentlichungszeitpunkt der Studie entwickelt werden. Diese Edge-Computing-Anwendungsfälle werden hauptsächlich von Early-Adopters aus KMU umgesetzt. In einer Befragung wurden 37 zuvor definierte Herausforderungen und Potenziale durch 30 Early-Adopters aus verschiedenen Organisationen und Domänen und mit unterschiedlichen Rollen bewertet.

Eine konzeptuelle Gegenüberstellung der Themen Datenwirtschaft und Edge-Computing legt dar, dass Edge-Computing in verschiedenen Schritten der Datenwertschöpfungskette durch die lokale Durchführung von Prozessen eine wichtige Unterstützungsfunktion einnehmen kann. Mithilfe von Edge-Computing können die Gewinnung von Daten aus IoT-Umgebungen, Prozesse wie Datenaufbereitung und Datenanonymisierung sowie die Gewinnung und Bereitstellung von Informationen mit hoher Servicequalität erfüllt werden. Edge-Computing adressiert also auf konzeptioneller Ebene in der Datenwirtschaft herrschende Herausforderungen wie die Verwaltung und Analyse großer Datenmengen, die Einhaltung von Datenschutz- und Datensicherheitsrichtlinien sowie die technische Realisierung von Datensouveränität.

Die Studie stellt anhand von zehn realen Edge-Computing-Anwendungsfällen beispielhaft dar, wie Edge-Computing für interne Prozessinnovation sowie neuartige Produkte und Geschäftsmodelle in der Energie- und Wasserwirtschaft, der Gesundheitswirtschaft, der Lebensmittelindustrie, in der industriellen Produktion und im Bereich von Smart Living eingesetzt werden

kann. Die schematische Darstellung der Anwendungsfälle dient als Inspirationsquelle zur Entwicklung eigener Edge-Computing-Anwendungsfälle und zeigt verschiedene Ansätze zur technischen Realisierung auf. Die zugehörige Beschreibung der Anwendungsfälle zeigt, wie wichtig die Kollaboration verschiedener Akteure bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungsfällen ist.

Es sind vor allem wirtschaftliche und organisatorische Kriterien, die die Early-Adopters von Edge-Computing dazu bewegen, Edge-Computing-Anwendungsfälle aufzubauen: Die Befragten begründen ihre Motivation mit dem Vorantreiben der digitalen Transformation, der Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsbilanz sowie der Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen. Auf der anderen Seite identifizieren die Befragten insbesondere technische und organisatorische Faktoren als Hürden für die Umsetzung neuartiger Edge-Computing-Anwendungsfälle: Sie benennen unter anderem die Sicherstellung eines effizienten Gerätemanagements, das Fehlen von Standards für die Portabilität und Interoperabilität von Komponenten und Daten sowie den aktuell niedrigen Reifegrad technischer Lösungen zur Realisierung von Datensouveränität als Hemmfaktoren.

Die Analyse der Edge-Computing-Anwendungsfälle und der damit verbundenen Herausforderungen und Potenziale für Early-Adopters führt zu folgenden Handlungsempfehlungen für die Entwicklung von Edge-Computing-Anwendungsfällen:

- Handlungsempfehlungen zur Analyse des Status quo:
  - Anwendungen mit Echtzeitanforderungen und sehr großen Datenmengen als Startpunkt beachten
  - Nachhaltigkeit und soziale Faktoren als Treiber für den Einsatz von Edge-Computing berücksichtigen
- Handlungsempfehlungen zur Generierung neuer Ideen:
  - Kooperationspartner in die Ideengewinnung mit einbeziehen
  - Existierende Lösungen verbundener Domänen als Inspiration nutzen
  - Relevante Stakeholder im Unternehmen (u.a. Führungspersonal und Betreiber der existierenden IT-Infrastruktur) sowie potenzielle Kunden (intern oder extern) frühzeitig integrieren
- Handlungsempfehlungen zur Bewertung der Machbarkeit
  - Die Gesamtbetriebskosten bei der Evaluation beachten
  - Die rechtliche Perspektive frühzeitig analysieren

Diese Kurzstudie liefert Antworten auf die Fragen, wie Anwendungsfälle unter Nutzung von Edge-Computing-Ressourcen gestaltet werden können, welche Potenziale dabei ausschlaggebend und welche Herausforderungen für einen produktiven Einsatz zu überwinden sind. Die Studie gibt den Lesenden damit wichtige Hinweise für die Konzeptionierung und Konzeptevaluation eigener Edge-Computing-Anwendungsvorhaben.

Inhalt

1 Einleitung 4
2 Grundlagen 6
2.1 Datenwirtschaft 6
2.2 Edge-Computing 10
2.3 Die Bedeutung des Edge-Computing für die Datenwirtschaft 17
3 Anwendungsszenarien des Edge-Computing in der Datenwirtschaft 19
4 Potenziale und Hürden in der Praxis 39
4.1 Potenziale 40
4.2 Herausforderungen 44
5 Handlungsempfehlungen zur Definition von Edge-Computing-Anwendungsfällen 49
6 Literaturverzeichnis 57
7 Anhang 62

1 Einleitung

Im Zuge stetig wachsender Datenmengen ist der Wert von Daten als eigenes Wirtschaftsgut mit intrinsischem Wert zunehmend akzeptiert. Für Unternehmen entstehen Werte aus Daten, wenn diese transformiert, aggregiert und im Rahmen von Analyseverfahren in verwertbare Informationen gewandelt werden. So genutzt, stellen Daten die Basis für Operational Excellence, strategische Entscheidungsfindung und Innovation im Rahmen neuartiger Geschäftsmodelle oder verbesserter Wertversprechen dar (Legner et al., 2020). Die Fähigkeit zur Bewirtschaftung von Daten zur Maximierung des Datenwertes entlang der Datenwertschöpfungskette wird somit zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor und vermehrt zu einer Grundvoraussetzung für geschäftlichen Erfolg.

Eine Reihe von Faktoren limitiert derzeit die vollständige Ausschöpfung wirtschaftlicher Potenziale von Daten: Beispielsweise müssen Unternehmen zunächst leistungsfähige Dateninfrastrukturen schaffen, um Daten in ausreichender Qualität und in angemessener Zeit aufnehmen, verarbeiten und analysieren zu können. Es gilt, die Richtlinien für Datenschutz und Datensicherheit während der Datenverarbeitungsprozesse einzuhalten. Zudem befürchten Unternehmen den Verlust von Geschäftsgeheimnissen, wenn sie Daten mit Dritten teilen und stehen daher einer Kollaboration mit weiteren Unternehmen zurückhaltend gegenüber.

Edge-Computing kann als Technologie diese Hemmnisse überwinden, indem Daten in physischer Nähe zu ihrem Erzeugungsort verarbeitet und analysiert werden. Der Einbau von Edge-Computing-Rechenleistung beispielsweise in Anwendergeräte, Maschinen und Anlagen, Gebäude, Veranstaltungsstätten oder die existierende Telekommunikationsinfrastruktur sorgt durch die reduzierten Datenübertragungswege und lokale Datenverarbeitung für geringere Datenverarbeitungslatenzen. Der Einsatz der Technologie vereinfacht die Einhaltung rechtlicher Datenverarbeitungsvorschriften und die Zusammenarbeit mit Dritten unter Wahrung der Datensouveränität. Abseits dieser Faktoren kann der Einsatz von Edge-Computing Ressourcenverbräuche reduzieren und die Zufriedenheit der Nutzenden erhöhen.

Da es sich bei Edge-Computing um eine neue Technologie handelt, fehlen gegenwärtig das Bewusstsein und Verständnis für Edge-Computing im Allgemeinen sowie über den gewinnbringenden Einsatz von Edge-Computing in möglichen Anwendungsszenarien im Speziellen. Entsprechend werden die prognostizierten wirtschaftlichen Potenziale noch nicht vollumfänglich ausgeschöpft. Dies gilt insbesondere für die üblicherweise weniger digitalen kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) (techUK, 2021).

Basierend auf dieser Ausgangssituation liefert diese Kurzstudie Unternehmen, insbesondere KMU, eine Orientierungshilfe hinsichtlich des Einsatzes von Edge-Computing für Anwendungsfälle in der Datenwirtschaft. Sie richtet sich konkret an Personen aus der Exekutivebene und dem Bereich der Geschäftsentwicklung, die sich mit neuartigen, datengetriebenen Prozessverbesserungen oder Innovationen befassen. Dazu adressiert die Studie folgende Fragestellungen:

- Was wird unter dem Begriff „Datenwirtschaft“ verstanden und wodurch charakterisiert sich Edge-Computing?
- Wie können Edge-Computing-Anwendungsfälle konkret gestaltet werden?

- Welche technischen, organisatorischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Potenziale motivieren Unternehmen zum Einsatz von Edge-Computing in neuartigen Produkten, Services und Geschäftsmodellen und welche Herausforderungen sind bei deren Umsetzung zu bewältigen?
- Welche Aspekte sollten bei der Ausarbeitung und Evaluation von eigenen Edge-Computing-Produkten, -Services oder -Geschäftsmodellen besonders berücksichtigt werden?

Die Studie wurde im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm „Edge Datenwirtschaft“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erstellt. In dem Programm arbeiten zehn Projekte an der Erprobung innovativer Digitaltechnologien für die Datenwirtschaft im Edge-Cloud-Kontinuum[1]. Die in dieser Kurzstudie präsentierten Ergebnisse basieren auf der Analyse konkreter Edge-Computing-Anwendungsfälle, die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Studie in den Förderprojekten konzipiert und umgesetzt werden. Die Darstellung der Anwendungsfälle liefert konkrete Hinweise und Inspirationen zur Gestaltung von Edge-Computing-Anwendungsfällen. Um die Motivation und die Herausforderungen bei der Entwicklung und Einführung neuartiger Edge-Computing-Anwendungsfälle zu ermitteln und zu bewerten, wurde eine Befragung unter den Projektteilnehmenden in den Monaten August und September 2023 durchgeführt. Bei den Projektteilnehmenden handelt es sich vorrangig um Early-Adopters von Edge-Computing, die zum Teil erstmalig mit ihrer Organisation ein Edge-Computing-Anwendungsvorhabens umsetzen. Insgesamt 30 Umfrageteilnehmende, insbesondere aus den Domänen Energiewirtschaft, Fertigungsindustrie und Smart Living, bewerteten die zuvor kategorisierten Herausforderungen und Potenziale anhand einer Likert-Skala.

Diese Kurzstudie ist wie folgt strukturiert: Abschnitt 2 führt die Konzepte Datenwirtschaft und Edge-Computing ein, analysiert den aktuellen Stand der Technik und würdigt die Relevanz von Edge-Computing für die europäische Datenwirtschaft basierend auf den Potenzialen der Technologie. Der Abschnitt liefert die inhaltliche Grundlage dieser Kurzstudie und trägt zum besseren Verständnis der im Studienverlauf diskutierten Ergebnisse dar. Abschnitt 3 stellt Edge-Computing-Anwendungsszenarien aus verschiedenen Domänen und in unterschiedlichen Innovationsebenen – von interner Prozessinnovation hin zu neuartigen Geschäftsmodellen – dar. Die Beschreibungen behandeln zunächst den Leidensdruck und das Zielversprechen der Anwendungsvorhaben, um anschließend die konkrete Umsetzung mit Komponenten, Technologien, Akteuren und Prozessen zu erläutern. Die Leserinnen und Leser erhalten einen Einblick in mögliche Umsetzungsstrategien von Anwendungsfällen im Edge-Cloud-Kontinuum und in die damit verbundenen individuellen Herausforderungen und Chancen. Eine übergreifende Analyse und Bewertung der Potenziale und Herausforderungen aus der Perspektive der Early-Adopters ist in Abschnitt 4 zu finden. Basierend auf diesen Erkenntnissen gibt Abschnitt 5 pragmatische Handlungsempfehlungen zum Entwurf und zur Evaluierung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben.

[1] Weitere Informationen zum BMWK-Technologieprogramm „Edge Datenwirtschaft“ sind unter der Website www.edge-datenwirtschaft.de zu finden.

2 Grundlagen

Datenwirtschaft und Edge-Computing sind vergleichsweise neue Konzepte, die noch unscharf definiert sind. Daher führen wir zu Anfang in beide Konzepte ein. Zusätzlich werden die Nutzenversprechen und Herausforderungen in beiden Bereichen initial analysiert und eingeordnet und Datenwirtschaft und Edge-Computing auf konzeptioneller Ebene zusammengeführt. Dieser Abschnitt liefert entsprechend die Grundlage für die tiefergehenden Analysen im weiteren Verlauf dieser Studie.

2.1 Datenwirtschaft

Daten gelten zunehmend als wirtschaftliche Ressource. Ähnlich wie Arbeit und Kapital können sie als Mittel zur Erreichung unternehmerischer Zielstellungen eingesetzt werden. Dabei nehmen Daten im Besonderen die folgenden Rollen ein (Otto et al., 2022): Daten ermöglichen Operational-Excellence, d.h. die kontinuierliche Verbesserung der Kernprozesse eines Unternehmens. Daten helfen dabei, Geschäftsprozesse miteinander zu verzahnen und zu automatisieren oder die unternehmerische Entscheidungsfindung zu verbessern. Weiterhin sind Daten entscheidend für die Optimierung bestehender und die Entwicklung neuartiger Geschäftsmodelle und Services. Ein typisches Beispiel ist der „Everything-as-a-Service“-Ansatz, in dem Daten einerseits die Grundlage für nutzungsbasierte Abrechnung darstellen und andererseits neue Services wie vorrausschauende Wartung oder Zustandsfernüberwachung ermöglichen. Letztlich können auch Daten selbst zu einem Produkt werden, das über Datenmarktplätze oder Datenbroker gehandelt wird. Funktionierende Datenmärkte existieren beispielsweise in den Bereichen Finanz- oder Personendaten (Azcoitia & Laoutaris, 2022). Insgesamt entwickelt sich ein immer weiter wachsendes Ökosystem innovativer Technologien, Plattformen und digitaler Marktteilnehmer (Azkan et al., 2019).

Dieser Entwicklung wird mit der Einführung des Begriffs *Datenwirtschaft* Rechnung getragen, in der Daten die zentrale Ressource darstellen (Rohde, Bürger et al., 2022). Der konzeptionelle Unterschied bei der Generierung von Werten in der Datenwirtschaft gegenüber der traditionellen Wirtschaft basiert vor allem auf den besonderen Eigenschaften von Daten gegenüber anderen ökonomischen Ressourcen. So entsteht der Wert von Daten erst, wenn diese im Rahmen von Analysen mit anderen Daten zusammengeführt und zu verwertbaren Informationen transformiert werden. Bei Daten handelt es sich daher oftmals um Erfahrungsgüter, deren Wert erst nach der eigentlichen Nutzung bewertet werden kann. Zudem ist es möglich, Daten mit geringen marginalen Kosten zu replizieren (Koutroumpis et al., 2020).

Datenwirtschaft: Definition und Datenwertschöpfungskette

Derzeit existiert noch keine allgemeingültige Definition des Konzepts Datenwirtschaft (Azkan et al., 2019; Straßburg & Beckmann, 2022). Im deutschsprachigen Raum wird die Datenwirtschaft aus einer betriebswirtschaftlichen (mikroökonomischen) Perspektive oder einer gesamtwirtschaftlichen (makroökonomischen) Sicht betrachtet. Kerngedanke der mikroökonomischen Perspektive ist es, dass im Rahmen datenwirtschaftlicher Aktivität ein Einsatz von Daten und Algo-

rithmen zur Förderung neuartiger oder Ablösung bestehender Geschäftsmodelle in Unternehmen erfolgt. Erlöse aus diesen Modellen können sowohl intern als auch extern erwirtschaftet werden. Interne Erlöse werden generiert, wenn die gewonnenen Informationen einen Informationsvorsprung gegenüber den Wettbewerbern liefern, wohingegen in externen Erlösmodellen Informationen verkauft oder im Rahmen von Services kostenpflichtig bereitgestellt werden (Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V., 2018). Die makroökonomische Perspektive betrachtet dagegen primär die Beschreibung und Messung des Wertbeitrags von Daten und des durch Daten getriebenen Wandels der gesamtwirtschaftlichen Aktivität. Da diese Studie die Datenbewirtschaftung aus betrieblicher Sicht adressiert, wird die folgende betriebswirtschaftliche Definition zugrunde gelegt:

> *„Im Kern beschäftigt sich die Data Economy mit der Monetarisierung von Informationen auf Basis gewonnener Daten, welche mit einem Algorithmus zu werthaltigen Informationen transformiert und anschließend auf Basis der betriebswirtschaftlichen Funktionen zugänglich gemacht werden. Data Economy kann als eigenes Business-Modell betrieben werden oder unterstützt, verändert oder ersetzt bestehende Wertschöpfungsmodelle durch eine zunehmende Digitalisierung.“*
> (Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V., 2018)

Die aufkommende Datenwirtschaft verspricht Innovation und enorme Effizienzgewinne für viele etablierte Branchen (Curry et al., 2021). Neben finanziellen Gewinnen können die in der Datenwirtschaft generierten Informationen auch soziale und ökologische Mehrwerte liefern (Spiekermann, 2019). Zur Generierung der finanziellen und gesellschaftlichen Mehrwerte müssen auch in der Datenwirtschaft entsprechende Wertschöpfungsprozesse durchlaufen werden (siehe Abbildung 1). Im ersten Schritt werden Rohdaten etwa durch automatische Messungen oder manuelle Eingaben erhoben. Häufig können die Rohdaten nicht direkt weiterverarbeitet werden, sodass zunächst Aufbereitungsprozesse wie Datenbereinigung oder Datentransformation stattfinden müssen. Den eigentlichen Kern der Datenwirtschaft bildet die Zusammenführung von Daten im Rahmen von Analysemodellen in einem bestimmten Kontext. Die somit gewonnenen Informationen müssen anschließend den Informationsnutzenden über entsprechende Schnittstellen bereitgestellt werden. Letztlich erfolgt die wirtschaftliche Nutzung der Informationen durch Menschen und Maschinen.

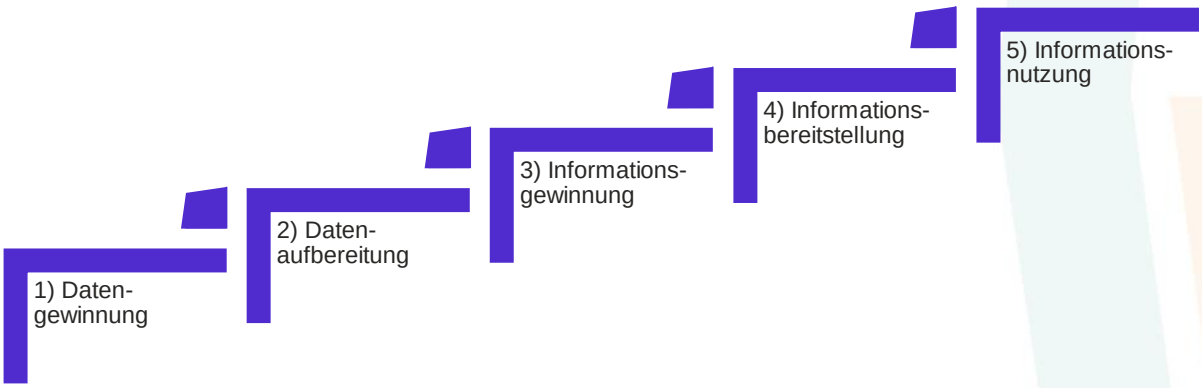


Abbildung 1: Die Wertschöpfungskette in der Datenwirtschaft gemäß Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V. (2018)

Entlang der Wertschöpfungskette werden verschiedene digitale Technologien eingesetzt, die einen Mehrwert aus Daten realisieren können (Spiekermann, 2019). Seit geraumer Zeit werden Cloud-Technologien zur Datenspeicherung, Bearbeitung und Analyse genutzt. Davon profitieren

insbesondere die Hyperscaler (u.a. Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure), die weltweit rund zwei Drittel des Cloudmarktes ausmachen. Die Marktmacht der Hyperscaler basiert auf drei Kernfähigkeiten der Datenwirtschaft: a) Rechen- und Speicherinfrastruktur in Kombination mit Datenservices, b) direkte Unternehmensdienstleistungen und Beratung und c) ein breiter Kundenstamm (Demchenko et al., 2018). Erfolgreiche Plattformen wie Uber oder Facebook profitieren insbesondere von der Auswertung der immensen Datenmengen, welche ihnen von den Plattformteilnehmenden zur Verfügung gestellt werden (Lauf et al., 2022). Dabei machen sich diese Unternehmen zu Nutzen, dass Wertströme in der Datenwirtschaft nicht wie üblich bidirektional verlaufen, sondern verschiedene Akteure unterschiedliche Arten von Werten austauschen. Derjenige, der von einem Service profitiert, muss nicht mehr derjenige sein, der für den Service bezahlt (Curry et al., 2021). So ist Google Maps für Privatpersonen kostenfrei, da der Dienst mittels Werbeeinnahmen durch Unternehmen finanziert wird.

Herausforderungen der Datenwirtschaft für Unternehmen

Studien zeigen, dass im Jahr 2022 nur etwa ein Drittel der deutschen Unternehmen aus der Industrie und industrienahen Dienstleistungen in der Lage war, Daten effizient zu bewirtschaften und in einer für die Datenwirtschaft befähigenden Weise zu nutzen (Büchel & Engels, 2022). Insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) fällt es schwer, an der Datenwirtschaft zu partizipieren (Büchel & Engels, 2022). Die Ursachen sind vielfältig und umfassen wirtschaftliche, organisatorische, technische und rechtliche Herausforderungen (Röhl et al., 2021).

Aus organisatorischer Sicht behindern eine fehlende Datenkultur und der Widerstand der Mitarbeiterschaft oftmals die Erarbeitung und Adoption neuer datenbasierter Lösungen (Rohde, Bürger et al., 2022). Aus rechtlicher Perspektive sind vielen Unternehmen Datenschutzaspekte unklar (Röhl et al., 2021). Zudem existieren Bedenken, den Datenschutz und die Datensicherheit technisch realisieren zu können (Fraunhofer ISST, 2023).

Die kontinuierlich steigenden Datenmengen, die entlang der jeweiligen Datenwertschöpfungsketten bewirtschaftet werden, erfordern ein adäquates Datenmanagement. Aus technischer Perspektive ist entscheidend, leistungsstarke Architekturen zur Verwaltung, Speicherung und Bearbeitung großer Datenmengen zu konzeptionieren und zu implementieren (Spiekermann, 2019). Dazu sind aus wirtschaftlicher Sicht die entstehenden hohen Kosten für die Entwicklung und Einführung datenbasierter Lösungen (Engels, 2017) und die Aufbereitung von Daten zum Aufbau einer ausreichenden Datenbasis (Rohde, Bürger et al., 2022) zu klären. Da die Akzeptanz und Nutzung und somit die Einnahmen vom Digitalisierungsgrad potenzieller Kunden abhängen, fällt es Unternehmen schwer, die Rentabilität von Innovationsvorhaben vorab zu kalkulieren. Unternehmen schrecken daher vor einer Einführung bestimmter Lösungen zurück (Rohde, Eisenträger et al., 2022).

Da gerade im Business-to-Business-Geschäft nicht alle erforderlichen Daten durch eine einzelne Organisation erhoben werden können, ist der Austausch von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg wichtig für die erfolgreiche Entwicklung von digitalen Geschäftsmodellen in der Datenwirtschaft (Curry et al., 2021; Spiekermann, 2019). Oftmals werden Daten aus mehreren Quellen und über Domänengrenzen hinweg benötigt. Daten werden dabei teilweise anders genutzt als ursprünglich geplant (Rohde, Eisenträger et al., 2022). Damit einher geht die Befürchtung, die Kontrolle über die eigenen Daten zu verlieren, wenn diese weitergegeben werden

(Curry et al., 2021) und damit unbefugten Dritten den Zugriff auf die eigenen Daten zu ermöglichen (Röhl et al., 2021). Entsprechend ist die Etablierung von technischen oder organisatorischen Mechanismen zur Herstellung von Datensouveränität (also der Möglichkeit zur Selbstbestimmung über die Verwendung von Daten auch nach deren Transfer) eine zentrale Herausforderung der Datenwirtschaft.

Anforderungen an Unternehmen zur Realisierung von Anwendungen in der Datenwirtschaft

Unternehmen, die eine Teilhabe an datenwirtschaftlicher Wertschöpfung anpeilen, müssen einen ausreichenden Reifegrad interner Strukturen und Prozesse schaffen. Einen großen Bereich nehmen dabei organisatorische Instrumente und Werkzeuge ein. Grundlage für datengetriebene Aktivitäten in Unternehmen ist die Entwicklung einer Datenstrategie, die den strategischen Umgang mit Daten im Unternehmen sowie den generellen Umgang und Austausch von Daten mit anderen Unternehmen festlegt (Fraunhofer ISST, 2022). Eine Datenstrategie gilt als Referenz für den Aufbau von Kompetenzen für den Umgang mit Daten. Sie beschreibt den Weg zur Erreichung eines höheren Datenmanagement-Reifegrads. Gleichzeitig gibt sie Hinweise auf die strategische Ausrichtung neuartiger datenbasierter Services. Ein weiterer Befähiger für die Teilhabe an der Datenwirtschaft stellt die Etablierung adäquater Data Governance-Mechanismen dar (Engels, 2019). Data Governance definiert Verantwortlichkeiten, Richtlinien und Prozesse für den Umgang mit Daten und stellt somit die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von Daten für die Entwicklung von datenbasierten Anwendungsfällen sicher. Die Etablierung von Datenkultur und Datenkompetenz sind wichtige Mechanismen, um den Umgang mit Daten und Technologien zu fördern. In der aktuellen Praxis bewährt sich zudem das Management von Daten als Produkt. Dabei werden Mechanismen des Produktmanagements wie Produktqualität und Nutzerzentriertheit auf das Datenmanagement appliziert, um Datensilos innerhalb von Unternehmen aufzuheben und eine agile Nutzung von Daten zu ermöglichen (Machado et al., 2022). Dies fördert die Betrachtung von Daten als alleinstehendes Wirtschaftsgut und schafft die Grundlage für das Teilen von Daten mit Dritten (Rohde, Eisenträger et al., 2022).

Basierend auf den organisatorischen Anforderungen muss eine Datenmanagement-Toollandschaft mit ausreichendem Reifegrad etabliert werden, die dem Unternehmen die Ausführung von Tätigkeiten entlang der zuvor erläuterten Datenwertschöpfungskette ermöglicht. Aus ökonomischer Sicht erfordert dies die Bereitstellung größerer Budgets für die Entwicklung der Technologielandschaft und von Kompetenzen wie z.B. der Datenanalyse (Fraunhofer ISST, 2022). Sind die Grundsätze ordnungsgemäßer Buchführung erfüllt, können Daten dann zumindest zu ihren Herstellungskosten in der Bilanz aktiviert werden (VDI-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2021).

Darüber hinaus müssen rechtliche Fragestellungen beantwortet werden, um an der Datenwirtschaft teilhaben zu können: Unternehmen müssen rechtliche Besonderheiten der Domäne kennen und abschätzen, welche Rechtsgebiete im Rahmen der Umsetzung von Anwendungsfällen in der Datenwirtschaft tangiert werden, um zumindest mit der internen rechtlichen Beratung oder gegenwärtigen Partnerkanzleien in den Dialog treten zu können (Rohde et al., 2023).

2.2 Edge-Computing

Zur Realisierung der wirtschaftlichen Verwertung von Daten setzen Unternehmen entlang der Datenwertschöpfungskette eine Reihe von Technologien zur Gewinnung, Verarbeitung und Bereitstellung von Daten bzw. Informationen ein. Eine immer relevanter werdende Technologie stellt Edge-Computing dar. Hinter dem Einsatz von Edge-Computing steht oft die Idee, den in Abschnitt 2.1 erläuterten Problemstellungen der Datenwirtschaft zu begegnen.

Die ursprüngliche strategische Motivation zum Einsatz von Edge-Computing liegt in der Limitierung der existierenden Internet-Infrastruktur: Die steigende Anzahl an intelligenten Dingen und Sensorik, beispielsweise im Bereich der industriellen Produktion oder der Wasser- und Energiewirtschaft, erzeugt immer größere Datenmengen und erfordert Entscheidungen in Echtzeit. Die existierende Internet-Infrastruktur funktioniert jedoch auf einer „best-effort"-Basis, sodass einzelne Datenübertragungen oftmals mehrere hundert Millisekunden dauern und neuartige Anwendungsfälle nicht unterstützen können (Linux Foundation, 2022). Neben diesen technologiegetriebenen Anreizen besteht, gerade im europäischen Raum, Zurückhaltung bei der Übertragung von Daten an zentrale Cloud-Services.

Der Anwendungsfokus digitaler Technologien wandelt sich von der Steigerung von Effizienz, Effektivität und Geschwindigkeit hin zur Bewältigung von Aufgaben auf eine vollständig neuartige Art und Weise. Hier kommt Edge-Computing eine entscheidende Rolle zu, indem es die gestiegenen Anforderungen in Richtung Regionalisierung und Abkehr von zentralisierter Infrastruktur unterstützt (Marcham, 2021). Edge-Computing kann sowohl domänenspezifische als auch domänenagnostische Anwendungsfälle realisieren.

Edge-Computing: Begriff und Typen

Unter Edge-Computing wird allgemein die Bereitstellung von Rechenkapazitäten und Speicher nahe der Grenze (Edge) zwischen der digitalen und der physischen Welt verstanden (ISO, 2020a; Linux Foundation, 2022). Die Edge wird insbesondere aus Sensoren und Aktoren gebildet, welche Signale und Zustände aus der physischen Welt für die digitale Welt verfügbar machen, bzw. Anweisungen aus der digitalen Welt in der physischen Welt umsetzen. Die konkrete Struktur der Edge kann dabei von System zu System abweichen (ISO, 2020a). Mit der Nähe zur Edge ist üblicherweise die Verschiebung von Infrastrukturen und Anwendungen weg von zentralisierten Rechenzentren und Cloud-Infrastrukturen und näher an den Ort der Datenerzeugung verbunden (Gole et al., 2023). Die reduzierte Distanz zwischen den Orten der Datenerzeugung und Datenverarbeitung bewirkt eine Verringerung der Latenzzeiten. Im extremen Fall kann die Edge-Rechenleistung direkt auf den Sensoren und Aktoren bereitstellen. In anderen Fällen ist die Edge-Computing-Rechenleistung von den Geräten getrennt, aber in deren physischer Nähe platziert (ISO, 2020a). Einfach gesagt umfasst Edge-Computing also alle Rechen- und Netzressourcen, die zwischen den Datenquellen und den Cloud-Rechenzentren liegen (Jain & Mohapatra, 2019). Ein Edge-Gerät ist dabei in der Regel mit mehreren Sensoren oder Aktoren verbunden, um Daten zu aggregieren oder zu verarbeiten. Edge-Computing ist ein verteiltes System, da Leistung und Speicher auf verschiedene Knoten nahe der Edge verteilt werden.

Hinsichtlich des konkreten Umfangs von Edge-Computing existieren verschiedene Sichtweisen. Diese Unklarheit resultiert unter anderem aus dem Bestreben kommerzieller Anbieter, den Begriff "Edge-Computing" als Modebegriff für angebotene Produkte und Dienste zu nutzen (Marcham, 2021). Aus Sicht der Linux Foundation (2022) fokussiert Edge-Computing insbesondere

auf Computing- und Speicherelemente im Netz der “letzten Meile”, wohingegen die EU-Kommission eine erweiterte Definition von Edge-Computing pflegt, die auch weiter entfernte Rechenzentren außerhalb der Hyperscaler-Infrastrukturen umfasst[2].

Entlang des Kontinuums von Edge zu Cloud existiert eine Reihe von Optionen zur Umsetzung von Edge-Computing, die allein oder in Kombination eingesetzt werden können. Die Entscheidung zur Platzierung von Rechenleistung und Speicher an konkreten Punkten entlang des Kontinuums hängt von den spezifischen Anforderungen des Anwendungsfalls ab. Abbildung 2 zeigt die Edge-Computing-Typologie gemäß 3DS Outscale et al. (2021).

Unter *On-Device Edge* versteht man die Bereitstellung einer Edge-Einheit direkt im Betrachtungsgegenstand wie beispielsweise einem Fahrzeug oder einem Gerät mit Sensoren, Aktoren oder einer Benutzeroberfläche. Edge-Einheiten in Geräten haben üblicherweise eine begrenzte Leistung und einen geringen Energieverbrauch. Sind die entsprechenden Geräte zusätzlich beweglich, so spricht man auch von Mobile Edge-Computing.

Die *On-Premise Edge* umfasst die Bereitstellung von Rechenleistung lokal für eine Umgebung, beispielsweise eine Fabrik oder ein Bürogebäude. Bei den bereitgestellten Lösungen kann es sich sowohl um traditionelle IT-Services als auch um neue, innovative Dienste handeln. Speicher- und Rechenleistung können entsprechend abhängig von diesen ausgestaltet werden. On-Premise-Infrastruktur wird üblicherweise im Rahmen eines privaten Deployments (s.u.) bereitgestellt.

Zur Abdeckung bestimmter Zonen mit hohen Bedarfen an Rechenleistung, Bandbreite und Latenz, wie beispielsweise Einkaufszentren oder Industriegebiete, stellen Service-Provider-Infrastruktur an der sogenannten *Far Edge* bereit. Diese kann im Rahmen eines public Deployment (s.u.) von verschiedenen Parteien für verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden.

Die *Near Edge* bezeichnet den Ort der Bereitstellung von Infrastrukturdiensten zwischen der Far Edge und den Rechenzentren der Cloud-Service-Provider. Dazu zählt beispielsweise die Bereitstellung von Infrastruktur in den Knotenpunkten der Telekommunikationsanbieter.

Derzeit wird prognostiziert, dass die zukünftige Edge-Computing-Infrastruktur insbesondere in den Geräten selbst und in der Infrastruktur des Telekommunikationsdienstleisters bereitgestellt werden wird. Eine Bereitstellung des On-Premise-Typs wird hingegen eine geringere Rolle spielen (Linux Foundation, 2022).

---

[2] Zusätzlich zu Edge-Computing existieren weitere verwandte Begriffe, die das Konzept der Verlagerung von Rechenleistung und Datenspeicherung näher an die Datenquelle bzw. das physische Objekt beschreiben. Dazu gehören:

- Fog-Computing: Horizontale Architektur, die Rechenleistung, Speicher, Kontrolle und Netzwerkressourcen entlang des Kontinuums von Cloud zu Objekt verteilt.
- Mist-Computing: Leichtgewichtigere Version von Fog-Computing, bei welcher die Datenverarbeitung und -speicherung auf intelligente Objekte am äußersten Netzwerkrand verteilt werden, um Autonomie und Selbstorganisation zu ermöglichen.
- Cloudlet: Kleines Rechenzentrum, das nahe der Edge platziert wird und die Vorteile von Cloud-Computing und Edge-Computing vereinigen soll.

In der Praxis ergänzen sich Edge- und Cloud-Ressourcen gegenseitig und werden daher gemeinsam eingesetzt. Der häufig beschriebene Wandel “von der Cloud zur Edge” entspricht eher dem Empfinden der Cloud-Service-Provider und Telekommunikationsanbieter, die nun vermehrt im Edge-Computing-Geschäft tätig werden. Die Nutzung von Cloud-Ressourcen und Edge-Ressourcen wird entsprechend den Anforderungen der Anwendung orchestriert. (*Public) Cloud*-Services bieten insbesondere Skalierbarkeit und Elastizität, sodass diese in Edge-Cloud-Szenarien insbesondere zur Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen verschiedener Quellen und zur Orchestrierung eingesetzt werden, während Edge-Computing für Teilaufgaben genutzt wird, die Echtzeitfähigkeit und Ausfallsicherheit benötigen. Typischerweise gehen in diesem hierarchischen System mit höherer Zentralisierung auch größere Möglichkeiten zur Aggregation von Daten aus internen und externen Quellen einher (ISO, 2020a).

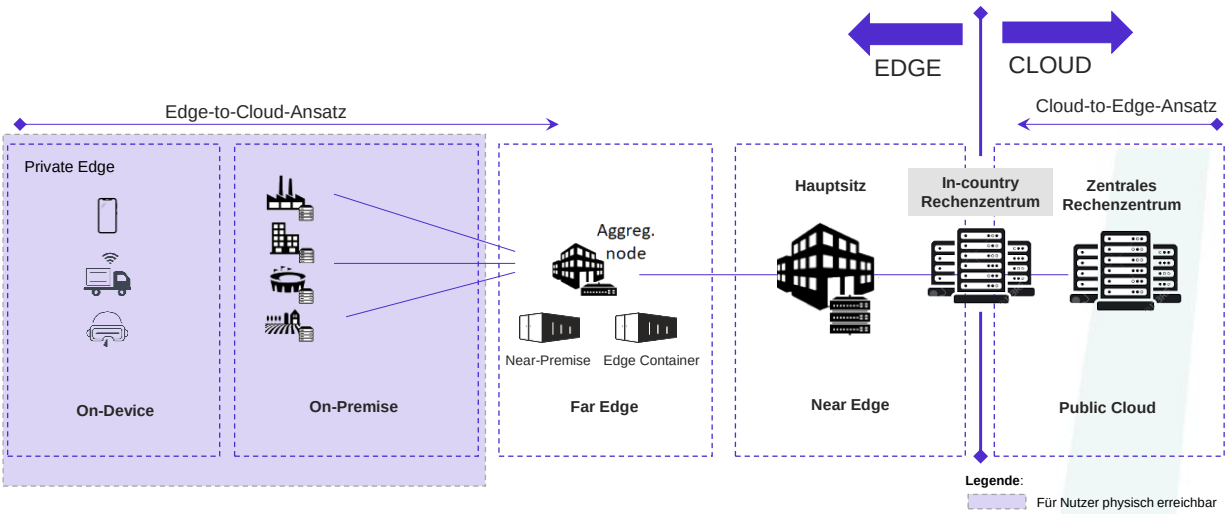


Abbildung 2: Edge-Cloud-Kontinuum modifiziert nach (3DS Outscale et al., 2021)

Wie bereits zuvor angedeutet, sind im Edge-Computing verschiedene Bereitstellungstypen, analog zu Modellen im Cloud-Computing, möglich (ISO, 2020a):

- Privates Deployment: Die betrachtete Organisation verfügt über das gesamte Deployment, indem sie es selbst verwaltet oder einen Service-Provider damit beauftragt.
- Public-Deployment: Die betrachtete Organisation teilt sich die Ressourcen mit anderen Organisationen. Die Ressourcen werden durch einen Service-Provider bereitgestellt.
- Community-Deployment: Das Deployment wird von einer Gruppe von Organisationen verwaltet, die eine (Geschäfts-) Beziehung miteinander besitzen und gemeinsame Anforderungen teilen.
- Hybrides Deployment: Eine Kombination der oben genannten Deployment-Modelle.

Der Einsatz von Edge-Computing entlang der Datenwertschöpfungskette

Zur Generierung von Werten in der der Datenwirtschaft ist neben Daten als zentraler Ressource prinzipiell der Einsatz verschiedener weiterer Technologien entlang der Datenwertschöpfungskette denkbar. Als eine dieser Technologien kann Edge-Computing entlang der Datenwertschöpfungskette zur Unterstützung verschiedener Teilaspekte eingesetzt werden (siehe Abbildung 3).

Im ersten Schritt (Datengewinnung) unterstützt Edge-Computing, hier insbesondere die Device-Edge, aufgrund der geringen Distanz zur Sensorik die Gewinnung großer Datenmengen aus Objekten und Prozessen (Munn, 2020). Auf Seiten der Device-Edge kann zudem eine virtuelle Sensorik implementiert werden. Diese ist in der Lage, aus verfügbaren Sensordaten (z.B. Bilddaten) weitere schwer messbare Größen abzuleiten.

Im Rahmen der Datenaufbereitung sind auf Edge-Geräten ausgeführte Anwendungen in der Lage, eine Bewertung der Daten, beispielsweise hinsichtlich deren Nutzwert oder Personenbezug durchzuführen (Giehl et al., 2021). Wurden personenbezogene Daten erkannt, kann eine Anonymisierung oder Pseudonymisierung der Daten lokal auf Edge-Geräten und vor der weiteren Verarbeitung stattfinden. Zudem sind weitere Datenaufbereitungsaspekte wie beispielsweise Datenbereinigung, -transformation oder -normalisierung als Grundlage für eine weiterführende Datenbearbeitung denkbar.

In der Phase der Informationsgewinnung befähigt Edge-Computing Anwendungsfälle, bei denen eine Prozessierung großer Datenmengen in Echtzeit erforderlich ist. Aufgrund der beschränkten Rechenressourcen der Edge-Geräte werden hierzu speziell konzeptionierte Analyse- und KI-Modelle (Edge-Analytics/Edge-KI) angewendet.

Die in den Analysen an der Edge gewonnenen Informationen können anschließend durch die Edge-Services bereitgestellt werden, um Zustandsänderungen an intelligenten Geräten zu erzielen, weitere Analysen durchzuführen oder langfristig von Cloud-Services gespeichert zu werden (Sittón-Candanedo et al., 2019). Andersherum können Informationen aus der Cloud durch Edge-Computing verwendet werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Modell für maschinelles Lernen in der Cloud trainiert und als leichtgewichtiges Modell an ein Edge-Gerät verteilt wird, welches dieses Modell nutzt, um neue Informationen zu gewinnen.

Abbildung 3: Die Rolle von Edge-Computing in der Datenwertschöpfungskette

Nutzenversprechen und grundsätzliche Herausforderungen

Der Einsatz von Edge-Computing bietet für viele Zielsetzungen ein hohes Potenzial: Aus technischer Perspektive motivieren die physische Nähe zum Ort der Datenerzeugung, die enge geographische Verteilung und die mobilen Einsatzmöglichkeiten der Edge-Geräte den Einsatz von

Edge-Computing. Diese technischen Eigenschaften bilden die Grundlage für darauf aufbauende Potenziale, die in konkreten Anwendungsvorhaben realisiert werden (Ahmed et al., 2017).

Hier sind vor allem die verringerte Latenz bei der Datenverarbeitung und die Ermöglichung von Anwendungskontinuität bei unsicherer Netzwerkverbindung zu nennen. Beide Eigenschaften können die Servicequalität von Anwendungen, insbesondere in ländlichen Regionen, verbessern. Edge-Computing fördert zudem Kontext- und Standortsensitivität und kann entsprechend Services in Abhängigkeit von äußeren Umständen bereitstellen oder deren Funktionsweise adaptiv anpassen (Ahmed et al., 2017). Es wird angenommen, dass Edge-Devices Datensicherheit und Datensouveränität fördern, indem sie Regeln und Richtlinien lokal umsetzen und beispielsweise nur verarbeitete oder anonymisierte Daten an Cloud-Systeme oder dritte Parteien zur weiteren Verarbeitung bereitstellen (Varghese & de Lara, 2021). Durch die Verbindung von Edge- und Cloud-Diensten werden die bisher schwer zu vereinbarenden Aspekte Datenschutz, Skalierbarkeit und Performance in Einklang gebracht (Kortum et al., 2023) und regulatorische Anforderungen, beispielsweise im Bereich kritischer Infrastrukturen, eingehalten.

Darüber hinaus wird angenommen, dass die intelligente Datenverteilung durch Edge-Computing den fossilen Primärenergieverbrauch von IT-Architekturen im Vergleich zu Cloud-zentrierten Szenarien reduzieren kann (European Commission, 2023). Diese Energieeinsparungen resultieren vor allem aus der Reduzierung der Rechenlast und der Netzwerkleistung bei geringerer Datenübertragung an Cloud-Services. Damit einhergehend können auch die Kosten für Netzwerkdienste in der Cloud sowie die generellen Datenübertragungskosten gesenkt werden. Diese Gegebenheit ist für Telekommunikationsdienstleister attraktiv, die mit stetig steigenden Kosten zur Aufrechterhaltung ihres Leistungsversprechens kämpfen.

Den vielfältigen Potenzialen stehen allerdings noch einige Hemmfaktoren gegenüber, die die Entwicklung und den produktiven Einsatz von Edge-Computing Lösungen erschweren und die teilweise vorhandene Zurückhaltung gegenüber Edge-Computing-Lösungen begründen. Dazu zählen einerseits betriebswirtschaftliche Faktoren: Edge-Computing erfordert potenziell höhere Investitionskosten als Cloud-Computing. Daher wird angenommen, dass Unternehmen aufgrund der unsicheren Rentabilität zögern, die Technologie zu erproben. Da Edge-Computing Anwendungsvorhaben üblicherweise in Kollaboration mehrerer Partner umgesetzt werden, ist eine faire Verteilung der Einnahmen zwischen den beteiligten Parteien mitunter schwierig (Khan et al., 2019).

Grundsätzliche Herausforderungen aus technischer Sicht sind das Management und die Orchestrierung der vielen heterogenen Edge-Computing-Geräte (Ahmed et al., 2017). Zudem wird die Skalierbarkeit durch limitierte Rechen- und Speicherkapazitäten der eingesetzten Edge-Computing-Hardware begrenzt (van der Meulen, 2018). Aus Sicht des Datenschutzes und der Datensicherheit müssen Lösungen für die verteilte Datenprozessierung, die Zusammenführung möglicherweise personenbezogener Daten und die beschränkte Verfügbarkeit der Edge-Computing-Ressourcen für Datenschutzmechanismen gefunden werden. Zudem muss die Sicherheit der physischen Infrastruktur garantiert werden. Die Konzeptionierung und Ausführung von Datenmanagement-Aspekten ist ebenfalls hoch komplex (Eclipse Foundation, 2023): Es gilt, Aspekte wie die Datennormalisierung (Zusammenführung der Daten verschiedener Quellen zu einem gemeinsamen Datenmodell), die effiziente Datenfilterung, die Datenabfrage und die Datentransformation (Shahzadi et al., 2017) in der verteilten Edge-Computing-Umgebung zu realisieren.

Während in diesem Abschnitt das Nutzenversprechen und die grundsätzlichen Herausforderungen aus einer allgemein-konzeptuellen Perspektive betrachtet wurden, werden diese in Abschnitt 3 anhand individueller Edge-Computing-Anwendungsvorhaben des Technologieprogramms „Edge Datenwirtschaft“ beschrieben und in Abschnitt 4 mit den konkreten Erfahrungen von Edge-Computing Early-Adopters gespiegelt.

Edge-Computing generiert Synergien mit weiteren Technologien

Der Einsatz von Edge-Computing bedingt Synergieeffekte mit einer Reihe weiterer Technologien. Organisationen nutzen einen Mix dieser Technologien, um das definierte Wertversprechen ihrer Lösung zu realisieren (Gole et al., 2023). Die konkrete Ausgestaltung des Technologiemix hängt von den Anforderungen der Anwendungsfälle ab. Einige Anwendungsfälle sind stationär, während andere mobil sein können. Technische Elemente wie das Datenvolumen, Toleranzen bei der Netzüberlastung und nicht-technische Faktoren wie die entstehenden Kosten spielen eine bei der Auslegung eine entscheidende Rolle. Eine Auswahl der Synergietechnologien ist in Tabelle 1 dargestellt.

Technologie	Beschreibung
5G und andere Netzwerktechnologien	5G stellt die neueste operative Netzwerktechnologie dar und zeichnet sich durch hohe Geschwindigkeit und Bandbreiten sowie geringen Latenzen aus. In 5G-Kommunikationsnetzwerken werden hochfrequente Wellenlängen genutzt, die leicht durch andere Objekte behindert werden können, weshalb kurze Abstände (etwa 1 Kilometer) zwischen den 5G-Basisstationen notwendig sind (ISO, 2023). Netzwerktechnologien stellen die Grundlage zur Verbindung von Sensorik, Edge-Geräten und Cloud-Rechenzentren dar (ISO, 2020a).
Distributed Ledger Technologie (DLT)	Distributed Ledger Technologien (DLT) besitzen zwei essenzielle Charakteristika: a) Sie stellen einen Datenspeicher bereit, der Aufzeichnungen von Transaktionen enthält, die, sobald gespeichert, nicht mehr verändert werden können und b) der Datenspeicher ist über eine Menge an Knoten verteilt und wird zwischen diesen mittels eines Konsensmechanismus synchronisiert (ISO, 2020b). Eine Ausprägung von DLT ist die Blockchain-Technologie. DLT kann Edge-Computing-Architekturen unter anderem bei der Authentifizierung von Personen und Objekten und dem Herstellen von Vertrauen, der autonomen Entscheidungsfindung oder im Datenmanagement unterstützen (Gadekallu et al., 2022).
Digitale Zwillinge	Ein digitaler Zwilling stellt das virtuelle Abbild eines real existierenden, physischen Produkts, Systems oder Prozesses dar, wobei das virtuelle Abbild und das physische Produkt in daten- bzw. informationsbasierter Wechselwirkung zueinander stehen. Edge-Computing-Technologie kann dabei unterstützen, digitale Zwillinge für verschiedene Anwendungsfälle lokal aufzubauen und schneller auf Ereignisse in der physischen Welt zu reagieren. Andersherum können auch für Edge-Cloud-Ökosysteme digitale Zwillinge erzeugt werden, die die Entwicklung, das Monitoring und das Management unterstützen.
High-Performance-Computing (HPC)	High-Performance-Computing-Systeme (HPC) sind in der Lage, viele Berechnungen parallel auszuführen (ISO/IEC, 2020). HPC wird vor allem für das Training von KI-Modellen mit großen Datenmengen eingesetzt, die anschließend auf den weniger leistungsfähigen Edge-Computing-Ressourcen lauffähig sind (Krishnasamy et al., 2020).

Technologie	Beschreibung
Künstliche Intelligenz (KI)	Im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) übernehmen Computer oder von Computern kontrollierte Roboter Aufgaben, die normalerweise mit menschlicher Intelligenz verbunden werden. Dazu gehören die Entdeckung von Zusammenhängen, Verallgemeinerungen oder das Lernen aus historischen Erfahrungen. Edge-Computing unterstützt den Einsatz von KI in kurzer räumlicher Distanz zur Datenerzeugung und kann so eine höhere Geschwindigkeit und Resilienz sowie einen verbesserten Datenschutz von KI-Anwendungen erreichen. Ein besonderes Verfahren des maschinellen Lernens stellt Federated Learning dar. Dort werden Modelle auf dezentralen Geräten trainiert, ohne die Rohdaten an eine zentrale Stelle zu übertragen.
Navigations- und Ortungstechnologien	Navigations- und Ortungstechnologien sorgen für die Feststellung der Positionen und Routen von Objekten. Sie sind beispielsweise relevant für autonomes Fahren, führerlose Transportfahrzeuge oder Lokalisierungssysteme in der industriellen Produktion. Edge-Computing unterstützt Navigations- und Ortungstechnologien, indem es große Datenmengen lokal analysiert und prozessiert und nur für das Gesamtsystem relevante Daten global verfügbar gemacht werden (El-Sheimy & Li, 2021).
Robotik	Roboter zur Bewegung, Manipulation oder Positionierung sind essenzielle Bestandteile moderner Fertigungsanlagen. Zunehmend werden Roboter auch in der Landwirtschaft, dem Gesundheitswesen oder der Raumfahrt eingesetzt. Edge-Computing unterstützt die Echtzeitfähigkeit von Robotikanwendungen wie etwa Objekterkennung, Positions- und Lageerkennung, Greifplanung und Echtzeitkontrolle (Groshev et al., 2023).
Internet of Things (IoT)	Das Internet der Dinge umfasst autonome Sensoren und Aktoren von Geräten (Dingen), die Daten aufnehmen und zur weiteren Verarbeitung über das Internet übertragen. Die lokale Erfassung von Daten über IoT stellt die Grundlage für die Datenverarbeitung mittels Edge-Computing dar. Auf der anderen Seite ermöglicht Edge-Computing durch die lokale Datenverarbeitung eine schnelle Datenanalyse und Informationsgenerierung, die zur Durchführung vieler IoT-basierter Anwendungsfälle benötigt wird (Gole et al., 2023).
(Virtuelle) Datenräume	Datenräume (Data Spaces) stellen eine virtuelle Struktur für den Austausch von Daten dar, die die Autonomie und Selbstbestimmung der Teilnehmer wahrt. In Datenräumen verbleiben die Daten bis zur Vereinbarung eines Datenaustausches auf Seiten der Datenerheber. Datenräume können auf verschiedenen Infrastrukturen basieren, die von Organisationen wie Gaia-X oder der International Data Spaces Association (IDSA) definiert werden. Der Austausch von Daten über Datenräume ergänzt Edge-Computing, indem lokal generierte Daten und Informationen unter Berücksichtigung von Datensicherheit und -souveränität zur weiteren Bearbeitung mit externen Entitäten geteilt werden können.

Tabelle 1: Mit dem Einsatz von Edge-Computing verbundene Technologien

Aktueller Status des Einsatzes und Marktes von Edge-Computing

Die Durchdringung von Edge-Computing ist noch vergleichsweise niedrig. So geben in 2022 in einer Umfrage der Eclipse Foundation nur etwa 53% aller Unternehmen an, Edge-Computing bereits zu nutzen oder innerhalb eines Jahres nutzen zu wollen (Eclipse Foundation, 2023) – im Vergleich dazu nutzen etwa 83% der Unternehmen in Europa Cloud-Computing (Gole et al.,

2023). Die meisten Unternehmen, die Edge-Computing nutzen, führen entsprechende Lösungen derzeit in einer Pilotierungsphase ein, um sich mit der Technologie vertraut zu machen. Dabei wird die Pilotierung oftmals auf einzelne Geschäftsbereiche beschränkt. Ein unternehmensweiter Roll-out wird nur in den seltensten Fällen durchgeführt (Gole et al., 2023). Während im Idealbild von Edge-Computing-Anwendungsfällen insbesondere das Modell des „Cyber Foraging“ (spontaner Transfer von rechenintensiven Aufgaben von technisch limitierten Geräten auf größere Rechenressourcen) skizziert wurde, handelt es sich bei den aktuell dominierenden Anwendungsfällen vorrangig um den Einsatz von langfristig stabilen Unternehmensanwendungen, etwa in Bereich von industrieller Sensorik oder Videoanalyse. Die Edge-Computing-Cluster werden dabei vorrangig durch das Anwenderunternehmen selbst bereitgestellt (privates Deployment) (Noghabi et al., 2019).

Der Edge-Computing-Markt hat noch eine geringe Reife. Viele der dort aktiven Unternehmen sind derzeit nicht in der Lage, die vier zur Erstellung ganzheitlicher Edge-Computing-Angebote notwendigen Geschäftsbereiche Hardware, Software, Services und Kommunikationstechnologien miteinander zu verbinden. Entsprechend wird die Implementierung von Edge-Computing-Lösungen oftmals federführend durch Servicedienstleister durchgeführt, die die aktuellen Angebote und Möglichkeiten zu deren Integration kennen (Gole et al., 2023). Gleichzeitig entstehen in schnellem Tempo neue Lösungen, die die Bedürfnisse individueller Industrien und Anwendungsfälle adressieren. Hyperscaler, IoT-Service-Provider und Telekommunikationsunternehmen liefern sich einen Wettkampf um den Edge-Computing-Markt, wobei derzeit nur die Hyperscaler durchgängige Leistungen anbieten können (3DS Outscale et al., 2021). Allerdings schließen sich auch Telekommunikationsunternehmen und Cloud-Provider zusammen, um für Kunden bekannte Cloud-Services näher an die Edge zu bringen (Linux Foundation, 2022).

2.3 Die Bedeutung des Edge-Computing für die Datenwirtschaft

Aus der hohen Komplexität datenwirtschaftlicher Wertschöpfung resultieren viele Herausforderungen für Unternehmen, denen sie mit dem Einsatz von Edge-Computing begegnen können (siehe Abbildung 4).

Der Schutz von Personendaten sowie die Einhaltung von Datensicherheitsrichtlinien werden durch die Verarbeitung von Daten an der Edge verbessert. Schützenswerte Daten werden lokal verarbeitet und ausschließlich weniger sensitive Daten an Partner oder Cloud-Umgebungen transferiert. Gleichzeitig wird die Datensouveränität der Unternehmen gestärkt, da große Datenmengen lokal und somit im Einflussbereich der Unternehmen verbleiben. Dies hilft auch gegen das geringe Vertrauen in Partner, da nun nur noch weniger problematische Daten mit diesen geteilt werden müssen.

Die Verwaltung der immer weiter steigenden Datenmengen stellt ein weiteres Problem der Datenwirtschaft dar. Der Einsatz von Edge-Computing ermöglicht hier eine Datenvorverarbeitung und damit eine Reduktion der insgesamt zu speichernden oder zu verwaltenden Datenmengen.

Gegen die hohen Kosten für den Aufbau der Datenbasis hilft Edge-Computing auf zweierlei Weise: Einerseits wird durch den Einsatz von Edge-Computing die Notwendigkeit zur Nutzung von langfristig kostspieligen Cloud-Services reduziert. Insbesondere sind hier die Ausgaben für Netzwerkdienste zu nennen. Andererseits werden die durch Datenübertragungen hervorgerufenen Energiekosten gesenkt.

Im selben Zuge ist insgesamt die Bereitstellung einer leistungsfähigen und nachhaltigen Infrastruktur zur Datenverarbeitung notwendig. Edge-Computing hilft, indem es die Latenzen zur Datenbearbeitung absenkt und höhere Bandbreiten bei der Datenübertragung zum Ort der Datenanalyse zulässt. Gleichermaßen kann die Resilienz der Infrastruktur gegenüber Konnektivitätsausfällen durch Edge-Computing verbessert werden.

Neben den Potenzialen des Einsatzes von Edge-Computing für die Datenwirtschaft existieren auch einige sich überschneidende Herausforderungen beider Themengebiete, die durch Unternehmen adressiert werden müssen. Hierzu gehören die Abschätzung der durch die Unternehmung erzielten Kapitalrendite oder die Begegnung von Akzeptanzproblemen in der Mitarbeiterschaft bei der Einführung datengetriebener Lösungen.

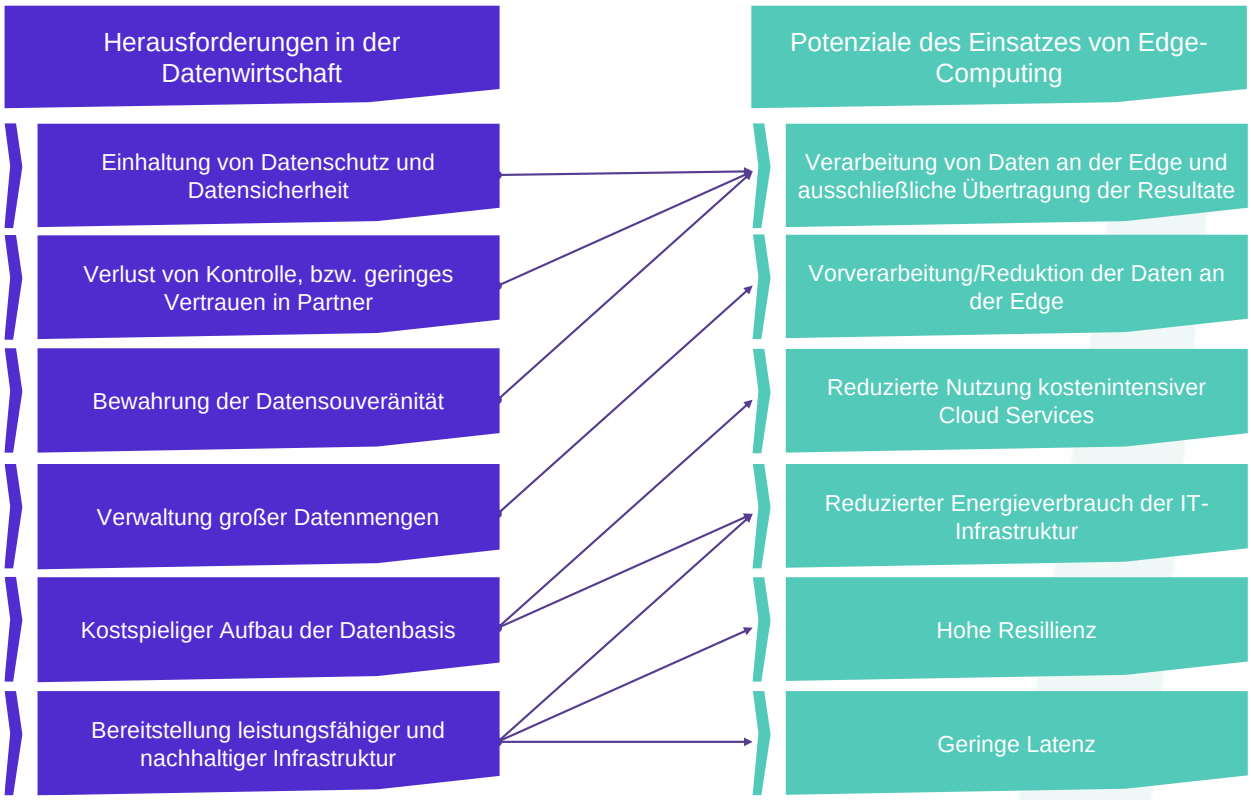


Abbildung 4: Die Bedeutung von Edge-Computing für die Datenwirtschaft

3 Anwendungsszenarien des Edge-Computing in der Datenwirtschaft

In diesem Kapitel werden reale Anwendungsszenarien, in denen Edge-Computing zur Förderung der Datenbewirtschaftung in unterschiedlichen Branchen eingesetzt wird, dargestellt und analysiert. Die folgend dargestellten Anwendungsszenarien beschreiben insbesondere die Verwertungsperspektive der (kleinen und mittelständischen) Unternehmen in den zehn Projekten des Technologieprogramms Edge-Datenwirtschaft. Der Einsatz von Edge-Computing erfolgt in den Anwendungsszenarien keineswegs als Selbstzweck, sondern ist jeweils von individuellen Potenzialen motiviert (für eine übergreifende Übersicht der Potenziale und Herausforderungen der Early-Adopter siehe Abschnitt 4). Edge-Computing ist damit der Treiber für neuartige datenwirtschaftliche Anwendungsfälle bzw. Geschäftsmodelle in unterschiedlichen Domänen.

Der Einsatz von Edge-Computing kann analog zum Einsatz von Cloud-Computing (Muhic & Bengtsson, 2021) drei verschiedene Arten von Geschäftsmodellinnovationen ermöglichen:

- Verbesserung interner Prozesse, indem Entscheidungen schneller und besser getroffen werden. Die Verlagerung von Services von der Cloud an die Edge ermöglicht durch die lokale Verarbeitung von Daten geringere Datenübertragungslatenzen und den Einbezug zusätzlicher (Prozess-) Daten in die Entscheidungsfindung.
- Produktinnovationen und Erschließung neuer Märkte, beispielsweise durch DSGVO-konforme Datenverarbeitung.
- Architektonische und digitale Innovationen auf strategischer Ebene, beispielsweise durch den Aufbau leistungsbasierter Abrechnungsmodelle.

Eine Übersicht der Anwendungsszenarien eingeordnet nach Hauptanwendungsdomäne und Geschäftsmodellinnovationstyp findet sich in Abbildung 5. Die Anwendungsszenarien geben einen Überblick über die vielfältigen Umsetzungsstrategien von Anwendungsfällen im Edge-Cloud-Kontinuum und liefern Inspirationen für die Umsetzung eigener Edge-Computing-Anwendungsfälle. Die Problemstellung, das Zielversprechen und die konkrete Realisierung der Anwendungsszenarien werden textuell beschrieben. Dazu gehören insbesondere die verwendeten Komponenten und Technologien, die Akteure und ihre Rollen sowie die im Anwendungsprojekt definierten Prozesse und die individuellen Potenziale und Herausforderungen bei der Umsetzung des Anwendungsvorhabens. Als Orientierungshilfe entlang dieses Kapitels wird jedes Anwendungsvorhaben durch ein Anwendungsfallsteckbrief dargestellt.

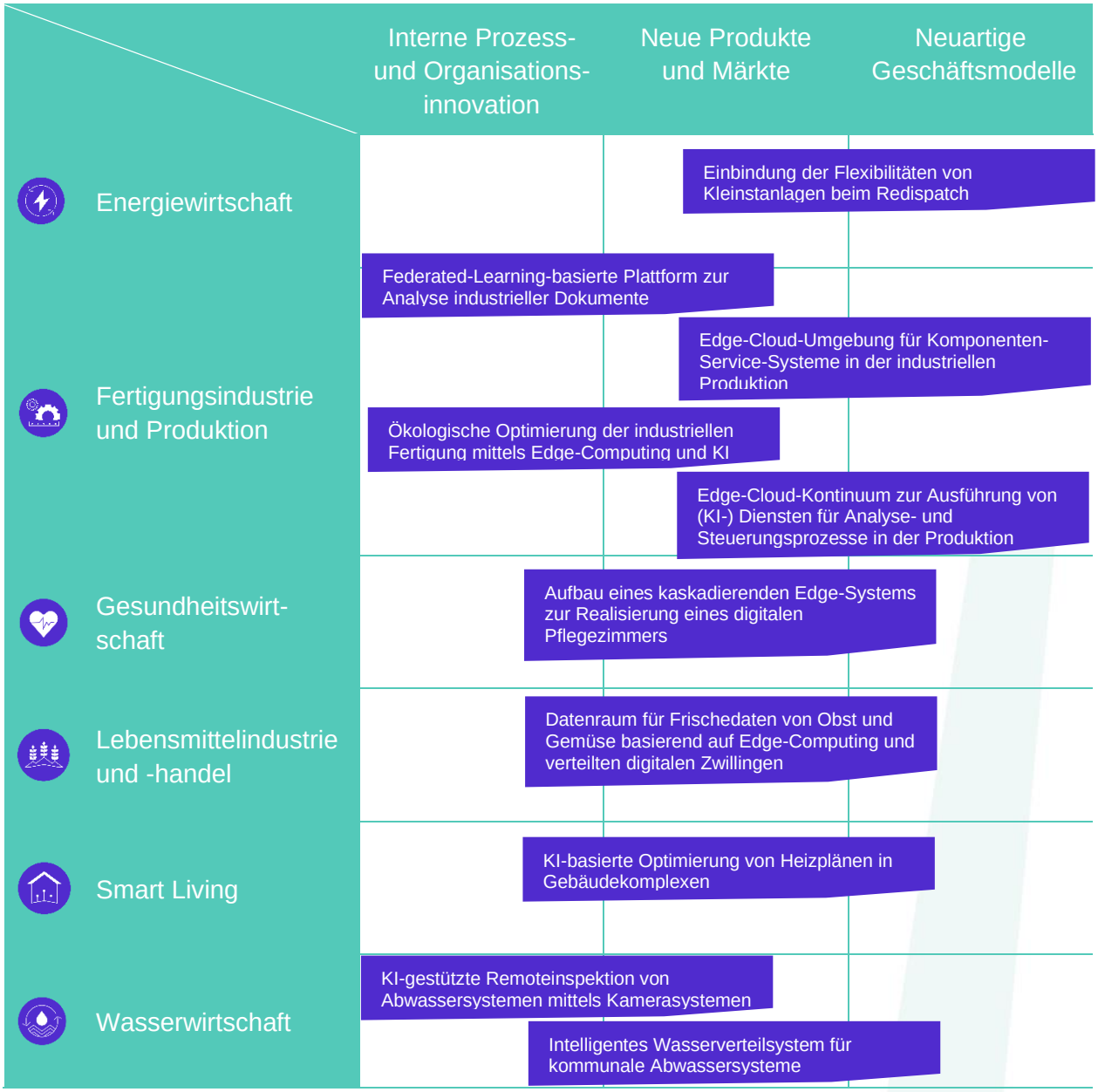


Abbildung 5: Übersicht der dargestellten Edge-Computing-Anwendungsszenarien zugeordnet zu Industriezweig und Innovationsart

KI-gestützte Remoteinspektion von Abwassersystemen mittels Kamerasystemen

Die Wasserwirtschaft ist gegenwärtig stark dezentral organisiert. So existieren tausende Betriebe, die mehrere Anlagen, wie beispielsweise Abwassersysteme, unterhalten. Durch ihre Einstufung als kritische Infrastruktur unterliegen diese Anlagen besonderen regulatorischen Anforderungen. Zur Inspektion und gegebenenfalls Wartung der Anlagen sind gegenwärtig Vor-Ort Besichtigungen durch entsprechendes Fachpersonal notwendig. Hierdurch werden Fachpersonal an wenig produktive Aufgaben gebunden und zusätzliche CO_2-Emissionen verursacht. Zudem kann die inkrementelle Prüfung Schäden erst mit Verzögerung feststellen.

In diesem Anwendungsvorhaben soll ein System zur intelligenten Remoteinspektion von Anlagen der Wasserwirtschaft etabliert werden. Kamerasysteme führen eine kontinuierliche Zustandsüberwachung von Abwasseranlagen durch, die eine automatische Identifizierung von sich abzeichnenden Gefahren oder Schäden in Echtzeit ermöglicht. Im Falle einer durch das

System identifizierten Krise wird der Anlagenbetreiber benachrichtigt, damit er eine anlassbezogene Besichtigung der Anlage durch geeignetes Fachpersonal veranlassen kann. Bei der Realisierung des Systems sind insbesondere die Richtlinien für kritische Infrastruktur zu betrachten und notwendige Mechanismen zur Gewährleistung von Datenschutz und Datensicherheit umzusetzen. Zusätzlich soll das System flexibel für verschiedenste Abwasseranlagen einsetzbar sein.

Zur technischen Realisierung des Anwendungsszenarios sind Beiträge von drei Akteuren essenziell, für die jeweils ein langfristiges Geschäftsmodell etabliert wird:

- Der Anlagenbetreiber stellt die Möglichkeit zum Aufbau des Kamerasystems bereit. Gegen monetäre Gegenleistung erhält dieser eine laufende Überwachung der Anlage und kann damit Kosten und Personal reduzieren.
- Gerätehersteller liefern Kamerasysteme zur Überwachung sowie Edge-Computing-Ressourcen, die möglicherweise an die vorliegenden Umweltbedingungen angepasst werden müssen.
- Servicedienstleister oder Softwarehersteller stellen KI-Systeme und eine zentralisierte Plattform bereit, über die die Daten für den Anlagenbetreiber langfristig verfügbar gemacht werden.

Konkret wird zur technischen Realisierung ein Kamerasystem auf Seiten des Anlagenbetreibers installiert, das eine kontinuierliche Aufzeichnung der Inspektionsschwerpunkte liefert. Das IoT-fähige Kamerasystem übermittelt die Daten an ein Edge-Computing-Modul, das die Daten mittels KI lokal beim Anlagenbetreiber auf Basis vorab trainierter Modelle analysiert. Zur Informationsbereitstellung, zum Management des Systems und zur anlassbezogenen Sichtung des Live-Kamerabildes einzelner Anlagen wird ein auf einer zentralen Plattform basierendes Portal genutzt, auf das der Anlagenbetreiber zugreifen kann. Als Kommunikationsinfrastruktur wird dabei insbesondere auf 5G-Technologie zurückgegriffen.

Edge-Computing wird im Anwendungsszenario insbesondere für die Durchführung von Datenanalyseprozessen genutzt und unterstützt eine ausschließlich bedarfsgerechte Datenübertragung an die zentrale Plattform. Durch die umfassende lokale Analyse der Daten wird eine zuverlässige Datenverarbeitung auch bei geringer Netzabdeckung oder Netzunterbrechungen ermöglicht. In diesem Kontext kann auch die DSGVO-konforme Verarbeitung von personenbezogenen Daten gewährleistet werden. Generell treibt das Anwendungsvorhaben die digitale Transformation der Wasserwirtschaft voran, indem vormals analoge Prozesse digitalisiert werden.

Eine der größten Herausforderungen bei der Umsetzung des Anwendungsszenarios stellt die Einhaltung geltender Rechtsvorschriften im Bereich kritischer Infrastrukturen dar. Um die Akzeptanz der Lösung zu erhöhen, müssen dedizierte Vertragswerke zwischen den Anlagenbetreibern und dem Systemanbieter ausgearbeitet werden. Darüber hinaus gilt es, den Vorbehalten der Anwender hinsichtlich der Beibehaltung ihrer Handlungsfreiheit und der Möglichkeit eines Anbieterwechsels zu begegnen.

KI-gestützte Remoteinspektion von Abwassersystemen mittels Kamerasystemen				
Anwendungsbranchen				
Wasserwirtschaft				
Aufgabendomäne				
Zustandsüberprüfung von Anlagen Sicherheit und Überwachung von Gebäuden		Qualitätsmanagement		
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
5G Künstliche Intelligenz & Machine-Learning		Cloud-Computing Sensorik & Internet of Things		
Datentypen				
Audiodaten Sensordaten		Bilddaten		
Personenbezogene Daten vorhanden		nein		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI, …)				
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **ARIKI** (https://www.aws-institut.de/research/ariki/)				

Aufbau eines kaskadierenden Edge-Systems zur Realisierung eines digitalen Pflegezimmers

In der Pflege wird heute größtenteils analog dokumentiert. Entsprechend hoch ist der Aufwand des Pflegepersonals für Routineaufgaben wie die Messung gängiger Vitalparameter (Puls, Blutdruck, Temperatur, Sauerstoffsättigung etc.) und die Dokumentation dieser Werte. Um das Pflegepersonal zu entlasten und eine kontinuierliche Prüfung des Gesundheitszustands zu ermöglichen, bedarf es eines Systems, das mittels digitaler Technologien die Vitalparameter der Patientinnen und Patienten kontinuierlich aufnimmt und dem Pflegepersonal eine Übersicht liefert. Die Erfassung der Vitalparameter kann über intelligente Hardware wie beispielsweise Pflegebetten, Sitzkissen oder Pflegeroboter erfolgen. Die Daten werden mittels Sensorik kontaktlos erfasst, an der Edge verarbeitet und in Pflegezustandsinformationen transformiert. Die erhobenen Informationen können in existierende Systeme im Bereich der Pflege (z.B. in eine Pflegedokumentationssoftware) integriert werden und ermöglichen so eine langfristige digitale Nachvollziehbarkeit des Gesundheitszustands der Patientinnen und Patienten. Aufgrund der hohen Sensibilität der erfassten und verarbeiteten Daten hat der Datenschutz bei der Umsetzung des Systems hohe Priorität.

Damit das Anwendungsvorhaben erfolgreich realisiert werden kann, müssen diverse Beteiligte kollaborativ zusammenarbeiten, da Kompetenzen aus den Bereichen Medizintechnik, Edge- und Cloud-Infrastrukturen sowie zu existierenden Pflege-Softwaresystemen benötigt werden:

- Die Patientinnen und Patienten sind bei der Realisierung des Anwendungsvorhabens größtenteils passiv beteiligt. Sie interagieren über die reine Nutzung des intelligenten Pflegezimmers (Bett, Sitzkissen, Roboter bzw. Tablet) mit dem System und können bei Bedarf die erhobenen Daten einsehen.

- Medizintechnik-Unternehmen können innovative Systeme zur Erfassung von Vitalparametern bereitstellen, die in das Gesamtkonzept eingebunden werden.
- Weitere Akteure sind für die Bereitstellung einer Edge-Plattform, die zur Datenverarbeitung und Kommunikation zwischen der Pflegehardware, Edge-Computing-Systemen und der Cloud benötigt wird, verantwortlich.

Die kontinuierlich erfassten Pflegezustandsinformationen können zur Pflegeplanung oder zur Anpassung von Pflegemaßnahmen an Drittsysteme weitergegeben und durch das Pflegepersonal genutzt werden. Dadurch entsteht ein digitaler Zwilling der Pflegebedürftigen, mit dem Änderungen des Gesundheitszustands oder des Pflegegrades frühzeitig erkannt werden können.

Mit dem Anwendungsvorhaben entsteht ein kaskadierendes Edge-Cloud-System, in dem die Datenverarbeitung durch verkettete Edge-Knoten realisiert wird. Im Anwendungsvorhaben fallen vor allem Sensordaten an, die durch die intelligente Hardware kontaktlos erfasst werden. Die anfallenden Daten werden in der ersten Stufe des Systems direkt an der Hardware vorverarbeitet und zu digitalen Vitalwerten transformiert (virtuelle Sensorik). Zur Weiterverarbeitung sollen zukünftig zusätzlich Methoden der künstlichen Intelligenz eingesetzt werden. Auf der zweiten Stufe des Systems werden die Vitalwerte zusammengeführt und die Qualität der Informationen durch deren Aggregation verbessert. In diesem Zusammenhang erfolgt auch eine Reduktion der an die Cloud transferierten Daten. Die Weitergabe der Daten an Drittsysteme wird durch den Einsatz von Datenraumtechnologien gestützt.

Als größtes Potenzial des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens für zukünftige Anwenderunternehmen in der Pflege wurde die frühzeitige Berücksichtigung aktueller Gesetzgebungen zur Digitalisierung und Nutzung von KI identifiziert. Anwenderunternehmen können dann sicher sein, dass das intelligente Pflegezimmer auch langfristig die rechtlichen Vorgaben erfüllt. Die in diesem Vorhaben erprobte Architektur liefert eine Blaupause, die in weiteren Anwendungsfällen der Gesundheitswirtschaft verwendet werden kann. Sie ist damit ein weiterer wichtiger Baustein für die Digitalisierung der Pflegebranche.

Gleichwohl existieren Herausforderungen bei der Realisierung des Anwendungsvorhabens: Zum einen existieren viele Standards (u.a. Loinc, Snowmed, FHIR), die entweder nicht zum Einsatz kommen oder unvernetzt nebeneinander existieren. Dieser Zustand erfordert einen hohen Integrationsaufwand, um die Interoperabilität und Portabilität von Daten und Hardware sicherzustellen. Andererseits werden umfangreiche Kompetenzen für rechtliche Aspekte benötigt. So müssen zur Datenüberlassung bzw. Datennutzung entsprechende Vertragswerke zwischen den Patientinnen und Patienten sowie den Anwendenden des Systems generiert werden. Darüber hinaus gilt es, die aktuellen Gesetzgebungsaktivitäten im Digitalbereich kontinuierlich zu analysieren und das System daran auszurichten.

Aufbau eines kaskadierenden Edge-Systems zur Realisierung eines digitalen Pflegezimmers				
Anwendungsbranchen				
Gesundheits- und Pflegewesen				
Aufgabendomäne				
Qualitätsmanagement		Prozessautomatisierung und -steuerung		
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Digitaler Zwilling Virtuelle Datenräume		Sensorik & Internet-of-Things Künstliche Intelligenz		
Datentypen				
Sensordaten		Sensordaten		
Personenbezogene Daten vorhanden		ja		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Digitaler Zwilling		Sensorik & Internet-of-Things		
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **CAREFUL-EDGE-X** (https://carefuledgex.de/)				

Einbindung der Flexibilitäten von Kleinstanlagen beim Redispatch

Redispatch-Maßnahmen werden durchgeführt, um Engpässe im Stromnetz zu vermeiden. Dabei werden Betreiber eines Kraftwerkes angewiesen, ihre Einspeiseleistung zu erhöhen oder zu drosseln. Die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien führt dazu, dass Redispatch-Maßnahmen in Deutschland häufiger notwendig werden. Dabei werden derzeit nur Anlagen mit einer Leistung größer als 100 kW berücksichtigt. Dezentrale kleinere Anlagen oder Anlagen ohne separaten Stromzähler, wie z.B. Wärmepumpen oder E-Autos, werden bisher nicht eingebunden. Aufgrund der aufwändigen Einbindung dieser heterogenen Anlagen bleibt das Potenzial einer großen Menge von Erzeugungsanlagen für den Redispatch bisher ungenutzt. Insbesondere die Koordination bzw. Aggregation, Nachweisführung und Abrechnung der Redispatch-Kapazitäten der dezentralen Anlagen stellen eine Herausforderung dar.

Zur Einbindung dezentraler Kleinstanlagen bedarf es eines Systems, in dem sich einzelne Kleinstanlagen autonom zu einem Verbund zusammenschließen, um am Redispatch teilnehmen zu können. Dabei muss die Verteilung des Redispatch auf die partizipierenden Anlagen möglichst effizient, unter Berücksichtigung der regulatorischen Pflichten (Nachweispflicht) und ohne eine Beeinträchtigung des Primärzwecks der Anlage erfolgen. Neben der wirtschaftlichen Effizienz sind zudem Aspekte aus den Bereichen von Datenschutz, Vertrauenswürdigkeit der Daten und digitaler Souveränität zu beachten.

Verschiedene Akteure sind an der Umsetzung des dezentralen Redispatch beteiligt:

- Anlagenbetreiber stellen die Kapazität ihrer Anlage zur Verfügung und betreiben für ihre Anlage einen Agenten an der Edge, der autonom mit anderen Agenten interagiert, um Redispatch-Kapazitäten zur Verfügung zu stellen. Anlagenbetreiber erhalten so die Möglichkeit, unter Berücksichtigung von Datenschutzanforderungen am Redispatch teilzuhaben.

- Aggregatoren bündeln einzelne Kapazitäten, um sie zu vermarkten und auf einer Flexibilitätsplattform zur Verfügung zu stellen. Andersherum verteilen die Aggregatoren beauftragte Kapazitäten auf die einzelnen Anlagen.
- Die Flexibilitätsplattform listet die verfügbaren Redispatch-Kapazitäten, die von Netzbetreibern analysiert und beauftragt werden können.

Neben Edge-Computing sind hier IoT sowie digitale Identitäten und Blockchain-Technologie weitere zentrale Mittel. Mittels IoT-Technologien wird die notwendige Kommunikation zwischen Kleinstanlage und Edge-Computing-Device sichergestellt. Auf dem Edge-Device wird ein autonomer Agent betrieben, der mit anderen Agenten in einem Multi-Agenten-System interagiert und kommuniziert. Entsprechend finden Prozesse wie beispielsweise die Datenvorverarbeitung, Datenbereinigung, Datenauswertung sowie die Verschlüsselung der Daten und die Kommunikation an der Edge statt. Digitale Identitäten und Blockchain-Technologie werden zur Erstellung verifizierbarer Redispatch-Nachweise und Abrechnungen genutzt, die auch für die Flexibilitätsplattform verfügbar gemacht werden. Zusätzlich unterstützen diese den souveränen und die Privatsphäre schützenden Datenaustausch.

Einbindung der Flexibilitäten von Kleinstanlagen beim Redispatch				
Anwendungsbranchen				
Energiewirtschaft				
Aufgabendomäne				
Zustandsüberprüfung		Anlagensteuerung		
Prozessautomatisierung & -steuerung				
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Blockchain / Distributed-Ledger-Technologien		Sensorik & Internet-of-Things		
Digitale Identitäten		Multi-Agent-Systems		
Datentypen				
Textdaten		Sensordaten (Data Streams)		
Strukturierte/Tabellarische Daten				
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API)				
Personenbezogene Daten vorhanden		Ja		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation …)		Datenbereinigung		
Datenverschlüsselung		Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics)		
Kommunikation mit anderen Edge-Geräten				
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **DEER** (https://deer-projekt.de/)				

Der Einsatz von Edge-Computing ermöglicht die Resilienz der eingesetzten Dateninfrastruktur und erhöht die Datensouveränität. Er ermöglicht zudem die effizientere Nutzung von Ressourcen und gerätebezogenen Diensten. Als größte Herausforderungen für die Umsetzung in der

Praxis gelten die aufwändige Anbindung an die bestehende Infrastruktur, die langfristige Sicherstellung von Daten- und Gerätesicherheit sowie die Befürchtung der Anwender, nur mit hohem Aufwand die genutzte Umgebung wechseln zu können.

Edge-Cloud-Kontinuum zur Ausführung von (KI-) Diensten für Analyse- und Steuerungsprozesse in der Produktion

Zur Erreichung von Effizienzsteigerungen, Nachhaltigkeit und Flexibilität in der industriellen Produktion sind Digitalisierung und Vernetzung der Produktionssysteme unabdingbar. Zu diesem Zweck werden Betriebstechnologie (Sensoren, Aktoren und Steuerungssysteme) und Informationstechnologie zusammengebracht, was als IT-OT-Konvergenz bezeichnet wird. Zur Zusammenführung von Maschinendaten und zu deren Analyse werden üblicherweise zentrale Dienste in der Cloud genutzt. Durch die hohen Latenzen bei der Datenübertragung ergeben sich dabei jedoch Probleme hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit der Systeme. Weiterhin entstehen durch die großen Datenübertragungsmengen hohe Ressourcenverbräuche. Zudem schrecken die datengebenden Industrieunternehmen vor der Nutzung von Cloud-Services zurück, da sie einen Verlust von proprietärem Wissen befürchten.

Zur Ausschöpfung der Potenziale von Informationstechnologie für die industrielle Produktion wird ein Edge-Cloud-Kontinuum geschaffen, das eine Laufzeitumgebung zur Anwendung von KI-basierten Analyse- und Steuerungsdiensten bereitstellt. Anwenderunternehmen erhalten die Möglichkeit, selbst über den Ort der Serviceausführung und den Transfer ihrer Daten zu entscheiden. Die Dienste können über einen Marktplatz bezogen werden und sich auf Basis ihrer Selbstbeschreibungen autonom konfigurieren. Mithilfe von Mess- und Analyseverfahren werden Ressourcenverbrauch und Datentransfers optimiert und die notwendige Rechenkapazität ausbalanciert. Bei der Entstehung des Edge-Cloud-Kontinuums soll insbesondere auf offene Standards und Schnittstellen zurückgegriffen werden, um die Interoperabilität von Komponenten, Services und Daten zu gewährleisten.

Das Anwendungsvorhaben liefert Mehrwerte für verschiedene Akteure:

- Industrieunternehmen, die Services im Edge-Cloud-Kontinuum nutzen, erhalten die Möglichkeit, Mehrwertdienste ohne Verlust von operativer Souveränität einzusetzen.
- Serviceentwickler können ihre Services unabhängig von der zugrundeliegenden Infrastruktur entlang des Edge-Cloud-Kontinuums entwickeln und auf einem Dienstemarktplatz anbieten.
- Anbieter von IT-Infrastruktur und Beratungsdienstleister können zusätzliche Mehrwertdienste bereitstellen.

Im entwickelten Edge-Cloud-Kontinuums kann grundsätzlich jegliche Art von Rechen- und Speicherinfrastruktur von der Edge bis zur Cloud verwendet werden. Durch die anlassbezogene und selbstbestimmte Übertragung der Daten entlang des Kontinuums entstehen virtuelle Datenräume. Je nach Einsatz des Cloud-Edge-Kontinuums können weitere Technologien zum Einsatz kommen. Sensorik und IoT werden zur Aufnahme der Daten auf der Feldebene eingesetzt. Mithilfe von Künstlicher Intelligenz werden Services erstellt, die entlang des Edge-Cloud-Kontinuums eingesetzt werden können, um beispielsweise Prozesse in der Fertigungssteuerung zu unterstützten. Je nach Ausprägung werden auch digitale Zwillinge eingesetzt.

Die größten Potenziale der Anwendung von Edge-Computing in diesem Anwendungsvorhaben liegen darin, die Zusammenarbeit von verschiedensten Akteuren unter Wahrung der Selbstbe-

stimmung der Datengeber, die zuverlässige Verarbeitung großer Datenmengen und die Aufrechterhaltung kontinuierlicher Handlungsfähigkeit zu ermöglichen. Zudem wird durch die Nutzbarmachung von digitalen Services unter Wahrung der Datensouveränität die digitale Transformation im Industriesektor vorangetrieben. Zur Realisierung des Edge-Cloud-Kontinuums bei zukünftigen Anwendern wurden die vorhandenen Vorbehalte hinsichtlich der Wahrung von Geschäftsgeheimnissen als Herausforderung identifiziert. Zusätzlich sind rechtliche Aspekte im Bereich der Haftung bzw. Marktregulierung zu klären. Entsprechend erscheint die Gestaltung zusätzlicher Vertragswerke, beispielsweise zur Datennutzung, erforderlich.

Edge-Cloud-Kontinuum zur Ausführung von (KI-) Diensten für Analyse- und Steuerungsprozesse in der Produktion				
Anwendungsbranchen				
Fertigungsindustrie			Lebensmittelindustrie	
Prozessindustrie				
Aufgabendomäne				
Zustandsüberwachung von Anlagen			Anlagensteuerung und -kontrolle	
Vorausschauende Instandhaltung			Qualitätsmanagement	
Prozessautomatisierung und -steuerung			Monitoring des Energieverbrauchs	
Fertigungsplanung und -steuerung				
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Cloud-Computing			Digitaler Zwilling	
Künstliche Intelligenz & Machine-Learning			Robotik	
Sensorik & Internet-of-Things			Virtuelle Datenräume	
Datentypen				
Bilddaten			Sensordaten (Data Streams)	
Semistrukturierte Daten			Strukturierte/Tabellarische Daten	
Datenzugriff				
über eine Programmierschnittstelle (API)			unter Nutzung von Plattformwerkzeugen für Datenströme (z.B. Apache Kafka)	
Personenbezogene Daten vorhanden			Nein	
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation…)			Datenbereinigung	
Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics)			Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge AI)	
Kommunikation mit anderen Edge-Geräten				
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **EASY** (https://easy-edge-cloud.de)				

Ökologische Optimierung der industriellen Fertigung mittels Edge-Computing und KI

Nachhaltigkeitsaspekte sind in der industriellen Fertigung ein immer wichtigerer Faktor. Industrieunternehmen definieren Nachhaltigkeitsstrategien, die beschreiben, wie der Wandel hin zu mehr ökologischer Effizienz gelingen soll. Oftmals fehlen den Unternehmen jedoch die Kompetenzen, Mechanismen und Werkzeuge, um konkrete Maßnahmen zu implementieren.

Zur Operationalisierung der Nachhaltigkeitsziele in der industriellen Fertigung werden diverse miteinander verbundene Maßnahmen erprobt. Dazu gehören u.a. die Einbeziehung von Nachhaltigkeitskriterien in Verfahren zur Prozessoptimierung und -flexibilisierung in der Produktion sowie die exakte Ermittlung von Nachhaltigkeitskennziffern gefertigter Produkte. In der folgenden Beschreibung wird der Fokus auf der Fertigungsoptimierung liegen. Besonders wichtig für die Umsetzung dieser neuartigen Werkzeuge ist deren Akzeptanz bei den beteiligten Zulieferunternehmen (darunter auch KMU) und Mitarbeitenden. Dazu sollen basierend auf Technologien, Mechanismen und Maßnahmen Geschäftsmodelle entstehen, die Anreize für die Implementierung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der industriellen Produktion setzen.

Zur Umsetzung der ökologischen Optimierung der Fertigung und Beschichtung sind Kompetenzen verschiedener Akteure erforderlich, für die wiederum neuartige Geschäftsmodelle entstehen. Anwenderunternehmen der industriellen Produktion stellen einen Zugang zu ihren Maschinen- und Planungsdaten zur Verfügung, die in KI-Verfahren integriert werden. Im Gegenzug erhalten sie eine neuartige Form der Produktionssteuerung, die Nachhaltigkeitsaspekte mit einbezieht. Serviceanbieter stellen KI-Services und weitere Infrastrukturservices bereit. Zusätzliche Potenziale ergeben sich für Hardwarehersteller und Dienstleister im Bereich der Systemintegration.

Zur nachhaltigen Optimierung der Produktion werden zuvor trainierte KI-Modelle auf Edge-Devices platziert, um Berechnungen in Echtzeit durchführen zu können und Datenbandbreite zu sparen. Daten aus den Planungssystemen und Echtzeitdaten aus der Produktion werden über einen Daten-Broker an die notwendigen Stellen verteilt. Durch die Zusammenführung der Produktions- und Planungsdaten in zuvor definierten Modellen entstehen digitale Zwillinge, die zur Optimierung der Verfahren eingesetzt werden können. Relevante erhobene Nachhaltigkeitsdaten werden in neue Produktionsdashboards eingebunden, die an zentraler Stelle zur Verfügung stehen und Daten aus weiteren Quellen integrieren. Auf Edge-Devices finden neben der Datenanalyse weitere Prozesse wie beispielsweise die Datenvorverarbeitung und Kommunikation zu anderen Edge-Devices statt.

Der Einsatz von Edge-Computing wird insbesondere durch die Möglichkeit der zuverlässigen Verarbeitung großer Datenmengen motiviert. Gleichermaßen kann Edge-Computing selbst auch dafür sorgen, die Nachhaltigkeitsbilanz durch Verringerung von Datentransfers in die Cloud zu verbessern. Die größte Herausforderung bei der Realisierung des Anwendungsvorhabens stellt die aufwändige Anbindung an existierende Systeme dar. Weiterhin muss eine effiziente Orchestrierung der verwendeten Systemkomponenten gewährleistet werden. Zusätzlich bestehen Bedenken von Anwenderseite, nur mit hohem Aufwand auf andere Technologien wechseln zu können.

Ökologische Optimierung der industriellen Fertigung mittels Edge-Computing und KI				
Anwendungsbranchen				
Fertigungsindustrie Mobilität und Verkehr			Logistik	
Aufgabendomäne				
Zustandsüberwachung von Anlagen Vorausschauende Instandhaltung Prozessautomatisierung und -steuerung (inkl. Transportlogistik)			Anlagensteuerung und -kontrolle Qualitätsmanagement Monitoring des Energieverbrauchs Modellierung des CO2-Fußabdrucks von Industrieprodukten (Produktion und Nutzung)	
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Digitaler Zwilling Navigations- und Ortungstechnologien Sensorik & Internet-of-Things Daten-Broker			Künstliche Intelligenz & Machine-Learning Robotik Virtuelle Datenräume	
Datentypen				
Textdaten Videodaten Semistrukturierte Daten			Bilddaten Sensordaten (Data Streams) Strukturierte/Tabellarische Daten	
Datenzugriff				
über eine Programmierschnittstelle (API) über eine Web-basierte Dokumentenverwaltung (z.B. Sharepoint)			per FTP unter Nutzung von Plattformwerkzeugen für Datenströme (z.B. Apache Kafka)	
Personenbezogene Daten vorhanden			Ja	
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …) Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics) Kommunikation mit anderen Edge-Geräten			Datenbereinigung Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI)	
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **EDNA** (https://edna-projekt.de/)				

Edge-Cloud-Umgebung für Komponenten-Service-Systeme in der industriellen Produktion

Die in der industriellen Produktion eingesetzten Werkzeugmaschinen verfügen über verschiedenste Komponenten mit eigener Sensorik, die von unterschiedlichen, spezialisierten Zulieferunternehmen bereitgestellt und in das Gesamtsystem verbaut werden. Die Komponentenhersteller verfügen über ein hohes technisches Wissen, das zur Realisierung datengetriebener Mehrwerte für Maschinenanwender und Werkzeugmaschinenbauer eingesetzt werden kann. Allerdings sind diese Mehrwerte derzeit aufgrund von Anforderungen wie beispielsweise Echtzeitfähigkeit und Datensouveränität nur schwierig realisierbar. Daneben existieren Befürchtungen von Vendor-Lock-in-Effekten bei Nutzung proprietärer Technologielösungen.

In diesem Anwendungsvorhaben werden Komponentenhersteller befähigt, eigene Services für ihre in Werkzeugmaschinen verbauten Komponenten bereitzustellen. Die Basis dazu stellt eine Edge-Cloud-Umgebung dar, die eine flexible Verwendung zuvor definierter Ressourcen entlang des Edge-Cloud-Kontinuums ermöglicht. Die Verteilung der Ressourcen erfolgt abhängig von den Anforderungen der Servicelösungen. Beispiele für Serviceleistungen stellen die digitale Inbetriebnahme, Condition-Monitoring oder die Möglichkeit für nutzungsbasierte Abrechnung in „as-a-Service"-Modellen für einzelne Komponenten dar.

Mit dem Anwendungsvorhaben entstehen Geschäftsökosysteme mit vielfältigen Akteuren, die sich je nach Anwendungsfall unterscheiden können. Im Zentrum der aktuellen Forschungsaktivitäten steht dabei der Komponentenhersteller, der sowohl die Komponente inklusive Sensorik als auch den zugehörigen Service bereitstellt. Dieser kann entweder durch den Werkzeugmaschinenbauer oder den Maschinenanwender genutzt werden. Entsprechend ergibt sich für den Komponentenhersteller die Möglichkeit zur Etablierung von neuartigen Geschäftsmodellen. Darüber hinaus können Anbieter von Cloud-Services und Edge-Hardware am Gesamtsystem partizipieren. Für Maschinenanwender und Produktionsunternehmen ergeben sich je nach Anwendungsfall Mehrwerte wie etwa eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs oder eine Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit.

Auch die Auswahl und das Zusammenspiel der genutzten Technologien ändert sich je nach Auslegung und Einsatzbereich der Edge-Cloud-Umgebung in der industriellen Produktion. Im Folgenden wird beispielhaft der Bereich Condition-Monitoring einer Motorspindel bzw. Predictive-Quality des Bearbeitungsprozesses mit Daten, welche die Komponente bereitstellt, betrachtet. In diesem Fall werden zunächst durch KI gestützte deterministische und leichtgewichtige Services zur Analyse der Prozessparameter an der Edge entwickelt. Im Betrieb nimmt die Motorspindel über Vibrations-, Verlagerungs- und Temperatursensoren und Aktoren zur Spindelsteuerung wichtige Prozessparameter auf und überträgt diese Daten an die Edge-Umgebung. In dieser werden die aufgenommenen Daten als Teil eines digitalen Zwillings analysiert und gegebenenfalls prekäre Größen wie kritische Bearbeitungsdrehzahlen oder Unwuchten erkannt, die zukünftig als Basis zur Optimierung von Prozessen und Prozessqualität genutzt werden können. Der lokale digitale Zwilling (also die lokale Instanz des digitalen Zwillings) der Komponente ist dabei durch seine „Plattform Industrie 4.0"-Verwaltungsschale auf einer in der Cloud bereitgestellten IoT-Plattform steuerbar. Edge-Computing übernimmt neben der Datenauswertung und -Analyse Aufgaben im Bereich der Datenvorverarbeitung beziehungsweise in der verschlüsselten Kommunikation mit den Objekten auf Feldebene (Maschinensteuerung und Spindel) und der Cloud. Die Interaktion zwischen Maschinenanwender und IoT-Plattform erfolgt auf Basis von Gaia-X-Vertrauensmechanismen. Die Authentifizierung und Autorisierung der Software- und Hardwarekomponenten, basierend auf dem Konzept von Self-Sovereign-Identities wird, mit Distributed-Ledger-Technologien (DLT) realisiert. Allen voran spielt DLT eine große Rolle beim Absichern der Datenintegrität der am Geschäftsprozess beteiligten Ökosystemteilnehmer.

Große Potenziale von Edge-Computing ergeben sich im Anwendungsvorhaben vor allem in der Realisierung zuvor nicht umsetzbarer Produkte und Services. Die Komponentenhersteller können nun selbst digitale Services ihrer Produkte vermarkten und anbieten und sind nicht wie bisher von Plattformanbietern abhängig. Diese neuen Dienste können spezifisch auf den Standort und die verwendete Hardware angepasst werden. Zudem werden durch den Einsatz von Edge-Computing aktuelle EU-Gesetzgebungsaktivitäten frühzeitig berücksichtigt. Zu den bei der Umsetzung des Vorhabens zu bewältigenden Problemen gehört vor allem der geringe Reifegrad

von Standardisierung im Bereich Edge-Computing und Datenwirtschaft. Gleiches gilt für zu nutzende Komponenten aus dem Bereich der Dateninfrastrukturinitiativen Gaia-X und IDS, die zur Gewährleistung von Datensouveränität herangezogen werden sollen. Weiterhin besitzen Anwenderunternehmen Vorbehalte hinsichtlich der Nutzung ihrer erhobenen Daten, sodass weitere Überzeugungsarbeit hinsichtlich einer Anbindung des Systems geleistet werden muss.

Edge-Cloud-Umgebung für Komponenten-Service-Systeme in der industriellen Produktion				
Anwendungsbranchen				
Fertigungsindustrie				
Aufgabendomäne				
Zustandsüberwachung		Vorausschauende Instandhaltung (Prescriptive Quality)		
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Blockchain / Distributed-Ledger-Technologien		Cloud-Computing		
Digitaler Zwilling		Künstliche Intelligenz & Machine-Learning		
Sensorik & Internet-of-Things		Virtuelle Datenräume		
Datentypen				
Sensordaten (Data Streams)		Strukturierte/Tabellarische Daten		
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API)		Plattformwerkzeuge für Datenströme (z.B. Apache Kafka)		
Personenbezogene Daten vorhanden		Nein		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …)		Datenbereinigung		
Datenverschlüsselung		Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics)		
Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI, …)		Kommunikation mit anderen Edge-Geräten		
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **ESCOM** (https://escom-project.de/)				

Datenraum für Frischedaten von Obst und Gemüse basierend auf Edge-Computing und verteilten digitalen Zwillingen

Die Güte von verderblichen Lebensmitteln im Einzelhandel wird größtenteils nur anhand des Erntezeitraumes festgestellt. Dies führt oft zu einer Resthaltbarkeit, die zu gering eingeschätzt wird. Entsprechend gelangen genießbare Lebensmittel in den Müll. Durch die Erfassung, Verwendung und das Teilen von zusätzlichen Daten entlang des Produktlebenszyklus, wie beispielsweise Wetterdaten während der Ernte oder Kühlungsdaten beim Transport, kann die Haltbarkeit mittels Analyseverfahren genauer ermittelt werden. Bislang existieren jedoch keine etablierten Gesamtsysteme zur Unterstützung von Haltbarkeitsprognosen für Obst und Gemüse.

Entsprechend bedarf es eines ganzheitlichen Systems, das die Frische- und Haltbarkeitsprognosen innerhalb der Produktionskette von leichtverderblichen Lebensmitteln wie Obst und Gemüse zwischen dem Produzenten über den Einzelhandel bis zu den Konsumenten erfasst, ver-

arbeitet und bereitstellt. Dabei werden Daten unter Nutzung verschiedenartiger Sensorik (Temperaturmessungen und Bilderfassungen in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums) erfasst, an der Edge analysiert und ein geteilter digitaler Zwilling der Produkte über die Systemgrenzen der beteiligten Parteien hinweg erstellt. Hierbei müssen eine vertrauenswürdige Erfassung der Daten und ein souveräner Datenaustausch zwischen den vielen Beteiligten der Lebensmittelindustrie sichergestellt werden.

Bei der Realisierung des Anwendungsszenarios entsteht eine intelligente Lieferkette unter Beteiligung diverser Akteure von „Farm-to-Fork“:

- Der Einzelhandel kann anhand der erhaltenen Daten aus vorgelagerten Stellen der Lieferkette bessere Haltbarkeitsprognosen erstellen und darauf aufbauend Lebensmittelverschwendung reduzieren und den Einkauf optimieren.
- Endkonsumenten erhalten eine höhere Transparenz über die gekauften Lebensmittel. Sie können bewusster einkaufen und die Lebensmittelnutzung besser planen.
- Vorgelagerte Akteure der Lieferketten sind vor allem als Datenlieferanten tätig. Sie erhalten die Möglichkeit, die Qualität ihrer Erzeugnisse dokumentieren.

Im Zentrum des Anwendungsvorhabens stehen geteilte digitale Zwillinge mit dem Fokus auf die Frische von Obst und Gemüse. Die zum Einsatz des digitalen Zwillings notwendigen Daten (Bild-, Spektral- und Temperaturdaten) werden über die verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette lokal erhoben und jeweils zunächst an der Edge analysiert. Dazu werden bereits vortrainierte Modelle an die Edge übertragen. Als Teil des digitalen Zwillings entstehen durch die Datenanalysen Prognosen für Haltbarkeit und Qualität. Während ein Teil des digitalen Zwillings an der Edge implementiert ist, wird ein anderer Teil in der Cloud realisiert. Dort sind Haltbarkeitsprognosen und Verwendungsvorschläge für die nachgelagerten Akteure der Lieferkette abrufbar. Zudem können die Frischedaten für weitere Akteure verfügbar gemacht werden.

Edge-Computing erfüllt dabei viele Funktionen: Daten werden an der Edge bereinigt und vorverarbeitet, KI-Algorithmen trainiert und angewendet und die Kommunikation zwischen den Systemen sichergestellt. Eines der größten Potenziale des Einsatzes von Edge-Computing ist die Optimierung von Prozessabläufen. Aus analogen und destruktiven Prüfungsverfahren entstehen durchgängige, nicht destruktive Prozesse. Durch diese automatisierte Untersuchung können verdorbene Produkte frühzeitig aus dem Lebensmittelbestand entfernt werden. Außerdem wird die Haltbarkeit und Qualität der Lebensmittel nachvollziehbar. Zusätzlich wird durch den Einsatz des Edge-basierten Gesamtsystems insgesamt die Digitalisierung der Lebensmittelindustrie vorangetrieben. Andererseits darf der hohe Investitionsaufwand nicht außer Acht gelassen werden: Jedes Unternehmen entlang der Lieferkette benötigt Sensoren und weitere Infrastruktur zur Datenverarbeitung. Entsprechend sehen Unternehmen bei einem unklaren Kosten-Nutzen-Verhältnis von einem Einsatz ab. Eine zusätzliche Herausforderung besteht in der Integration des Systems in bestehende Prozesse und Abläufe der Lebensmittelwirtschaft, beispielsweise im Rahmen des Einkaufs.

Datenraum für Frischedaten von Obst und Gemüse basierend auf Edge-Computing und verteilten digitalen Zwillingen				
Anwendungsbranchen				
Landwirtschaft			Lebensmittelindustrie	
Logistik				
Aufgabendomäne				
Qualitätsmanagement			Prozessautomatisierung und -steuerung	
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
5G			Cloud-Computing	
Digitaler Zwilling			High-Performance-Computing	
Künstliche Intelligenz & Machine-Learning			Sensorik & Internet-of-Things	
Virtuelle Datenräume				
Datentypen				
Textdaten			Bilddaten	
Videodaten			Sensordaten (Data Streams)	
Semistrukturierte Daten			Strukturierte/Tabellarische Daten	
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API)			Plattformwerkzeugen für Datenströme (z.B. Apache Kafka)	
Personenbezogene Daten vorhanden			Nein	
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …)			Datenbereinigung	
Datenverschlüsselung			Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics)	
Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI, …)			Kommunikation mit anderen Edge-Geräten	
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **FRED** (https://www.fred-bmwk.de/)				

Federated-Learning-basierte Plattform zur Analyse industrieller Dokumente

Das Wissen von Unternehmen wird üblicherweise in Dokumenten festgehalten. Dazu gehören in der Industrie etwa technische Zeichnungen, Verträge oder Ausschreibungsspezifikationen. Eine Analyse aller in einem Unternehmen existierender Dokumente ist für Menschen nicht mehr leistbar. Viele Unternehmen greifen daher auf KI-basierte Dokumentenanalysesoftware zurück, um existierendes Wissen zu analysieren und bereitzustellen. Derzeitige Angebote fordern dazu jedoch die Übertragung der zu analysierenden Dokumente auf leistungsstarke Cloud-Server, die mit einem Verlust der Datensouveränität für die Anwenderunternehmen einhergeht. Insbesondere konservative Unternehmen sehen daher von der Nutzung dieser Services ab, da sie die Aufdeckung von Geschäftsgeheimnissen und eine damit verbundene Reduktion ihrer Wettbewerbsfähigkeit fürchten. Zusätzlich führt der Transfer großer Datenmengen in die Cloud zu hohen CO_2-Emissionen.

Zur industriellen Dokumentenanalyse wird daher ein Edge-Cloud-System entwickelt, das eine lokale Analyse von relevanten Dokumenten mittels des Einsatzes von Federated-Learning ermöglicht. Spezifisch ist das System auf die Planung und Ausschreibung industrieller Anlagen

ausgerichtet. Dabei soll das System relevantes Domänenwissen mit einbeziehen können. Zusätzlich ist bei der Auslegung des Systems die beschränkte Rechenkapazität aktueller Edge-Computing-Devices zu berücksichtigen.

Zentrale Akteure des Anwendungsszenarios sind einerseits die Anwenderunternehmen, die eine gewisse Menge an zu analysierenden Dokumenten besitzen. Die Anwenderunternehmen stellen ihre eigene Infrastruktur zur Dokumentenanalyse an der Edge bereit. Im Gegenzug erhalten sie die Möglichkeit, Dokumentenanalysen, beispielsweise zur Planung und Ausschreibung industrieller Anlagen, durchzuführen. Servicedienstleister sorgen für die Bereitstellung der zu nutzenden Edge-Cloud-Analytics-Plattform und der Technologien zur Durchführung der Dokumentenanalyse basierend auf Federated-Learning. Neben einem neuartigen Geschäftsmodell und einer Einnahmequelle erhält der Servicedienstleister mit einer steigenden Anzahl von Anwendern zusätzliche Trainingsdaten, um sein Angebot zu verbessern.

Federated-Learning-basierte Plattform zur Analyse industrieller Dokumente				
Anwendungsbranchen				
Energiewirtschaft Mobilität und Verkehr Automotive			Fertigungsindustrie Prozessindustrie	
Aufgabendomäne				
Dokumentenanalyse			Prozessautomatisierung und -steuerung (Planungsprozesse)	
Computing Elemente entlang des Cloud-Edge-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Cloud-Computing Künstliche Intelligenz & Machine-Learning (Federated-Learning, Continual-Learning, Large-Language-Models, Document-AI, Representation-Learning, Trustworthy AI)			Digitaler Zwilling Virtuelle Datenräume Knowledge-Graphs	
Datentypen				
Textdaten Semistrukturierte Daten Dokumente			Bilddaten Strukturierte/Tabellarische Daten	
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API) Cloud-Service User-Interface			DBPedia Databus für Knowledge-Graphs, Trainingsdaten und Modelle	
Personenbezogene Daten vorhanden			Ja	
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …) Datenverschlüsselung			Datenbereinigung Ausführung von KI-Algorithmen (zur Information Extraction)	
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **openFLaaS** (www.openflaas.de)				

Generell kann die verteilte Dokumentenanalyse auf verschiedenen Typen von Edge-Computing-Devices ausgeführt werden. Dazu werden lokale KI-Modelle auf den Edge-Computing-Devices in geschützten KI-Räumen eingesetzt. Die dort ermittelten Ergebnismatrizen werden anschließend verschlüsselt an Cloud-Server übertragen, auf denen das globale KI-Modell trainiert wird. Neben Datenverschlüsselung und -auswertung erfolgen zudem Datenvorverarbeitungs- und Datenbereinigungsprozesse an der Edge.

Die wichtigsten durch das Anwendungsvorhaben realisierten Potenziale von Edge-Computing stellen die Gewährleistung von Datensouveränität, die Bereitstellung gerätebezogener Dienste und die Aufrechterhaltung der Handlungsfähigkeit des Anwenderunternehmens dar. Dem gegenüber stehen bei der Realisierung des Anwendungsvorhabens bei Anwenderunternehmen noch einige Herausforderungen: Dazu zählen der derzeit geringe Reifegrad technischer Instrumente zur Realisierung von Datensouveränität, die spärliche Verfügbarkeit von Fachkräften in den Bereichen KI und Edge-Computing und mögliche Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftig anfallenden Betriebskosten der Lösung.

Intelligentes Wasserverteilsystem für kommunale Abwassersysteme

Der Klimawandel führt immer häufiger zu extremen Wetterereignissen wie Hochwasser und Starkregen. Die dabei entstehenden Mischwasser aus Regen und Schmutzwasser werden in Regenrückhaltebecken aufgefangen, um anschließend in Klärwerken gereinigt und dem Wasserkreislauf zugeführt zu werden. Die aktuell in der Wasserwirtschaft eingesetzten reaktiven und oftmals analogen Verfahren und Methoden sind nicht ausreichend auf die extremen Wassermengen ausgelegt. Es kommt zu Entlastungen – auch als Abschläge bezeichnet – bei denen Mischwasser in umliegende Gewässer abgeleitet und diese natürlichen Ökosysteme geschädigt werden.

Daher bedarf es eines intelligenten Mess- und Steuersystems für Abwassersysteme, das insbesondere im Fall von mittelstarkem und starkem Regen in der Lage ist, die Wassermassen im Kanalnetz und in den Rückhaltebecken aufzuteilen, um Abschläge an einzelnen Stellen zu verhindern. Dabei ist insbesondere die Anwendungskontinuität zu gewährleisten, auch wenn im Falle eines Starkregenereignisses die Kommunikation zu einzelnen Teilsystemen abbricht. Da durch das Mess- und Steuersystem umfangreiche Daten über den Anlagenzustand erhoben werden, sollen diese auch zur Nutzung in weiteren Anwendungen verfügbar gemacht werden.

Zentrale Anwender des angestrebten intelligenten Mess- und Steuersystems sind kommunale Abwasserbetriebe, die mit der Anwendung eine höhere Leistungsfähigkeit des Abwassersystems erzielen. Konkret soll die Entlastungshäufigkeit, die Entlastungsdauer und die entlastete Menge der Abwassersysteme reduziert werden. Auch Bürgerinnen und Bürger (Reduktion der Abwassergebühr) und die Natur können von der Anwendung des Systems indirekt profitieren. Durch die Realisierung der Lösung ergeben sich neuartige Absatzmärkte für Hersteller von Hardware und Sensorik, KI-Entwickler und Systemintegratoren.

Zur Realisierung des Anwendungsvorhabens werden Technologien entlang eines dreistufigen Systems eingesetzt. Auf der Feldebene werden LP-WAN-fähige Sensoren innerhalb des Abwassersystems eingesetzt, um die Parameter zu ermitteln, die für die Bewertung des Systemzustands relevant sind (Pegelstände, Fließgeschwindigkeiten und Niederschlagsmengen). Die Edge-Ebene wird physisch an zentralen Bauwerken des Abwassersystems aufgebaut. Dazu zählen beispielsweise Rückhaltebecken, Pumpwerke und Kläranlagen. Dort werden mit Was-

serstand und Wasserqualität weitere Parameter erfasst. Zusätzlich werden auf dieser Ebene lokale KI-Teilsysteme konfiguriert, die im Notbetrieb die lokale Steuerung übernehmen. Dies ist der Fall, wenn die Verbindung zum Kontrollzentrum unterbrochen ist. Das Kontrollzentrum wird in der Cloud-Ebene realisiert. Durch die Kommunikation mit den Sensoren und Edge-Devices der unteren Ebenen findet im Falle ausreichender Konnektivität die Steuerung des Gesamtsystems in der Cloud statt. Dazu werden auch externe Daten wie Niederschlagsdaten und Wetterprognosen einbezogen. Zudem wird Cloud-Computing zum kontinuierlichen Training des globalen KI-Modells genutzt. Aktualisierte Teilmodelle werden kontinuierlich an die Edge-Ebene übertragen. Kommt es zu einem Verbindungsabbruch zwischen Kontrollzentrum und Edge-Ebene, übernimmt eine lokale KI die Steuerung auf Edge-Ebene.

Das größte Potenzial des Einsatzes von Edge-Computing liegt in der gesteigerten Resilienz der Dateninfrastruktur, die eine Steuerung des Abwassersystems auch bei Netzausfällen gewährleisten kann. Zudem unterstützt Edge-Computing die Berücksichtigung von spezifischen Datensicherheitsanforderungen kritischer Infrastruktur. Auf der anderen Seite stellen die Anbindung an die bestehende Datenmanagementinfrastruktur, die Orchestrierung und das Management der Edge-Devices sowie diverse rechtliche Fragestellungen relevante Herausforderungen bei der Umsetzung des Vorhabens dar.

Intelligentes Wasserverteilsystem für kommunale Abwassersysteme				
Anwendungsbranchen				
Wasserwirtschaft				
Aufgabendomäne				
Zustandsüberwachung von Anlagen		Anlagensteuerung und -kontrolle		
Prozessautomatisierung und -steuerung				
Computing Elemente entlang des Edge-Cloud-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Cloud-Computing		Künstliche Intelligenz & Machine-Learning		
Sensorik & Internet-of-Things				
Datentypen				
Sensordaten (Data-Streams)		Wetterdaten		
Aktordaten (Steuerung der Drosseleinrichtungen)		Bilddaten		
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API)		Plattformwerkzeugen für Datenströme (hier: MQTT-S)		
Personenbezogene Daten vorhanden		Nein		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …)		Datenbereinigung		
Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI, …)		Kommunikation mit anderen Edge-Geräten		
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **RIWWER** (https://www.riwwer.fraunhofer.de)				

KI-basierte Optimierung von Heizplänen in Gebäudekomplexen

Mehr als drei Viertel der Heizungen in deutschen Wohnungen nutzen fossile Energieträger. Das Retrofitting existierender Anlagen durch den Einbau smarter Thermostate und Regelungstechnik stellt eine Möglichkeit dar, den Verbrauch fossiler Energien zu reduzieren. Herkömmliche Produkte sind dabei in der Regel nicht selbstlernend und können daher das Verhalten und die Präferenzen ihrer Nutzer nicht hinreichend berücksichtigen, indem sie adaptiv auf sich änderndes Nutzerverhalten reagieren. Durch die beschränkte Kommunikationsfähigkeit der momentan eingesetzten Geräte wird maximal eine einzelne Wohneinheit optimiert. Eine ganzheitliche Optimierung der Gebäude und gegebenenfalls vorhandener Zentralheizungen bleibt aus. Zudem werden oftmals die erhobenen, personenbezogenen Daten auf Cloud-Servern im außereuropäischen Raum gespeichert, was die Selbstbestimmung der Nutzenden über ihre Daten limitiert.

Entsprechend bedarf es eines ganzheitlichen Systems, das einerseits Energieeinsparungen auf Anwenderseite (Wohnungsebene) fördert und andererseits die Energieeffizienz des gesamten Gebäudekomplexes durch Reduktion des Heizenergieverbrauchs an der Schnittstelle zur Zentralheizung erhöht. Dabei sind Vertrauenswürdigkeit und Akzeptanz der Lösung durch die Bewohnenden und Anwender aus der Wohnungswirtschaft ein wichtiges Ziel. Bei der Umsetzung der Lösung stehen daher der Komfort für die Bewohnenden und eine selbstbestimmte Steuerbarkeit des Systems im Vordergrund. Zudem müssen Datenschutz und Datensouveränität der Bewohnenden gewährleistet sein. Das Gesamtsystem wird offen und interoperabel gestaltet, sodass sich vielfältige Service- und Hardwareanbieter in das Gesamtsystem integrieren können.

Bei der Realisierung des Anwendungsszenarios entsteht ein Smart-Living-Ökosystem unter Beteiligung verschiedener Akteure:

- Die Mietenden und Bewohnenden interagieren mit dem System über Benutzeroberflächen und stellen Daten über ihr Heizverhalten bereit. Sie erhalten im Gegenzug eine Optimierung ihrer Heizkosten und eine verbesserte Luftqualität.
- Die Wohnungswirtschaft erhält eine höhere Flexibilität, beispielsweise bei Mieterwechseln, und kann durch die aggregierte Überwachung und KI-optimierte Steuerung ganze Gebäudekomplexe effizienter betreiben.
- Serviceanbieter leisten die Implementierung und Wartung von Software und KI-Modellen. Sie erhalten damit ein langfristiges Geschäftsmodell und den Zugang zu Daten zur kontinuierlichen Optimierung des Serviceangebots.
- Hardwarelieferanten sorgen für die Bereitstellung und den Betrieb der Geräte. Sie können einerseits ihren Absatz steigern und andererseits durch die geschaffene Interoperabilität einzelne Geräte in ganzheitliche Systeme integrieren.

Im Ergebnis entsteht ein System, das mehr ist als die Summe seiner Teile, da durch die integrierende, akteursübergreifende Umsetzung die Realisierung eines ganzheitlichen, nutzerzentrierten Systems möglich wird.

Zur technischen Realisierung werden Daten durch intelligente Sensorik (IoT) in den Räumen der Bewohnenden aufgenommen. Intelligente Aktoren sorgen dort für die Anpassung der Heizvorgänge. Auf Wohnungsebene wird Edge-Computing eingesetzt, um Daten zu aggregieren, Modelle für Wohnungen mittels Federated-Learning zu trainieren und die trainierten Modelle einzusetzen. Dabei spielen auch externe Informationen wie die Sonneneinstrahlung eine Rolle. Außerdem sorgt Edge-Computing für den datenschutzkonformen Betrieb der lokalen Modelle. Die Zentralheizung wird durch IoT-Technologien an der Edge eingebunden und ein Modell für

das gesamte Gebäude generiert. Zur Modellierung eines Gebäudekomplexes (Zusammenschluss von Gebäuden) wird ein globales KI-Modell in der Cloud generiert, das wiederum als Grundlage für die Optimierung der lokalen Modelle dient. Edge-Computing erfüllt hierbei eine Reihe von Funktionen: So werden Daten an der Edge bereinigt und vorverarbeitet, KI-Algorithmen trainiert und angewendet und die Kommunikation zwischen den verschiedenen Systemen sichergestellt.

KI-basierte Optimierung von Heizplänen für Gebäudekomplexe				
Anwendungsbranchen				
Energiewirtschaft		Smart Living		
Aufgabendomäne				
Anlagensteuerung & -kontrolle		Monitoring des Energieverbrauchs		
Prozessautomatisierung & -steuerung		Smart Building / Smart Home		
Computing Elemente entlang des Edge-Cloud-Kontinuums				
On-Device	On-Premise	Far Edge	Near Edge	Public Cloud
Genutzte Schlüsseltechnologien				
Cloud-Computing		Sensorik & Internet-of-Things		
Digitaler Zwilling		Virtuelle Datenräume		
Künstliche Intelligenz & Machine-Learning		Föderiertes Lernen		
Datentypen				
Sensordaten (Data Streams)		Strukturierte/Tabellarische Daten		
Semistrukturierte Daten				
Datenzugriff				
Programmierschnittstelle (API)		Plattformwerkzeuge für Datenströme		
Web-Basierte Dokumentenverwaltung				
Personenbezogene Daten vorhanden		Ja		
Prozesse auf Edge-Geräten				
Datenvorverarbeitung (Transformation, Aggregation, …)		Ausführung von KI-Algorithmen (z.B. Edge-AI)		
Datenbereinigung		Kommunikation mit anderen Edge-Geräten		
Datenauswertung (z.B. Predictive-Analytics)				
Das Anwendungsszenario ist Teil des Projekts **SECAI** (https://www.secai-energy.de/)				

Die größten Potenziale des Anwendungsszenarios sind die Reduktion des Heizenergieverbrauchs, die Steigerung der Nutzendenzufriedenheit und -akzeptanz durch eine komfortablere Heizungssteuerung und die Erzeugung von Vertrauen in die KI-Lösung sowie die Aufrechterhaltung der kontinuierlichen Handlungsfähigkeit. Zudem kann durch den Einsatz von Edge-Computing insgesamt eine stärkere Reduktion des ökologischen Fußabdrucks als bei herkömmlichen Methoden erfolgen. Die größte Herausforderung bei der Realisierung des Anwendungsszenarios stellt das Fehlen von Standards für Portabilität und Interoperabilität von Daten und Komponenten im Bereich Smart Living dar. Weiterhin sind die hohen Datenschutzanforderungen der Nutzenden zu erfüllen und der Umgang mit den erhobenen Daten transparent darzustellen. Ebenso müssen wirtschaftliche Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass sich der Einsatz des Systems für die Wohnungswirtschaft amortisiert.

4 Potenziale und Hürden in der Praxis

Bei der Entwicklung von Edge-Anwendungsvorhaben in der Praxis wird der Einsatz von Edge-Computing von einer Reihe spezifischer Potenziale motiviert und unterstützt. Gleichermaßen existieren bei der Umsetzung dieser Vorhaben individuelle Herausforderungen, die durch den aktuellen Stand der Technik im Bereich Edge-Computing bedingt sind. In diesem Abschnitt werden die Potenziale und Herausforderungen des Einsatzes von Edge-Computing zur Bewirtschaftung von Daten aus der Sicht von Early-Adopters, die sich derzeit mit der Entwicklung erster Edge-Computing-Anwendungsvorhaben befassen, dargestellt. Mit dieser Übersicht können sich Entscheider und Anwender in Unternehmen, die sich mit einer Einführung von Edge-Computing befassen, ein genaueres Bild über die Vorteile des Einsatzes aus Sicht verwandter Unternehmen machen. Sie erhalten aber auch Einblicke in mögliche Hindernisse bei der Umsetzung eigener Anwendungsvorhaben.

Die Ergebnisse basieren auf einer im August und September 2023 unter den Beteiligten des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Technologieprogramms „Edge Datenwirtschaft“ durchgeführten Online-Umfrage. Im Fokus der Umfrage standen die Bewertung zuvor definierter Potenziale und Herausforderungen für die (beziehungsweise bei der) Entwicklung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben auf einer vierstufigen Likert-Skala. Die Potenziale und Herausforderungen wurden in Kategorien eingeordnet und gruppenweise bewertet. Zusätzlich konnten die Studienteilnehmenden weitere Potenziale und Herausforderungen über Freitextfelder ergänzen. Aus den zehn befragten Projekten wurden insgesamt 30 gültige Antworten abgegeben. Mehr als die Hälfte der Umfrageteilnehmer entstammen privatwirtschaftlichen Unternehmen, davon wiederum etwa die Hälfte aus KMU. Die Befragten arbeiten insbesondere an Entwicklungsvorhaben in den Domänen Energiewirtschaft, Fertigungsindustrie und Smart Living, wobei ein Entwicklungsvorhaben auch in mehreren Domänen verortet sein kann. Weitere Expertise wurde aus Bereichen wie der Logistik, Wasserwirtschaft oder Landwirtschaft eingebracht. Bei der Realisierung des Entwicklungsvorhabens nehmen die Umfrageteilnehmer mit ihrer Organisation insbesondere die Rolle des Softwarelieferanten, Datengebers und Anwendungsnutzers ein. Die Erläuterung aller bewerteten Potenziale und Herausforderungen sind im Anhang dieser Studie zu finden.

Die Potenziale und Herausforderungen können wirtschaftlicher, organisatorischer, technischer oder rechtlicher Natur sein. Einzelne Faktoren wurden basierend auf ihrem primären Einflussbereich zu einer dieser vier Kategorien zugeordnet. Indirekte Effekte, beispielsweise die wirtschaftlichen Auswirkungen technischer Herausforderungen, sind dadurch nicht im Fokus. *Wirtschaftliche* Faktoren umfassen Potenziale und Herausforderungen auf Geschäftsmodellebene sowie hinsichtlich der zu erwartenden finanziellen Einnahmen und Ausgaben der Anwender. *Organisatorische* Faktoren beschreiben Einflüsse aus der Organisationsentwicklung, der Kollaboration innerhalb und außerhalb der Anwenderunternehmen und die Veränderung etablierter Arbeitsweisen. *Technische* Faktoren behandeln Aspekte in den Bereichen Datenmanagement, Datenverarbeitung und der zugrundeliegenden technischen Infrastruktur. *Rechtliche* Faktoren zielen auf die Einhaltung regulatorischer Rahmenbedingungen der Datenwirtschaft und dem Handelsrecht ab. Eine Übersicht über die aus Sicht der Early Adopters größten Potenziale von Edge-Computing-Anwendungsszenarien bzw. die größten Herausforderungen bei deren Realisierung findet sich in Abbildung 6.

Im Allgemeinen zeigt sich eine zuversichtliche Haltung der Early-Adopter gegenüber dem Einsatz von Edge-Computing in allen Sektoren. So wurden die Potenziale des Einsatzes von Edge-Computing gegenüber den Hürden bei der Umsetzung in der Praxis durchweg höher eingeschätzt. Im Folgenden werden zunächst die Potenziale von Anwendungsvorhaben genauer betrachtet, bevor die Analyse auf die Herausforderungen bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben fokussiert.

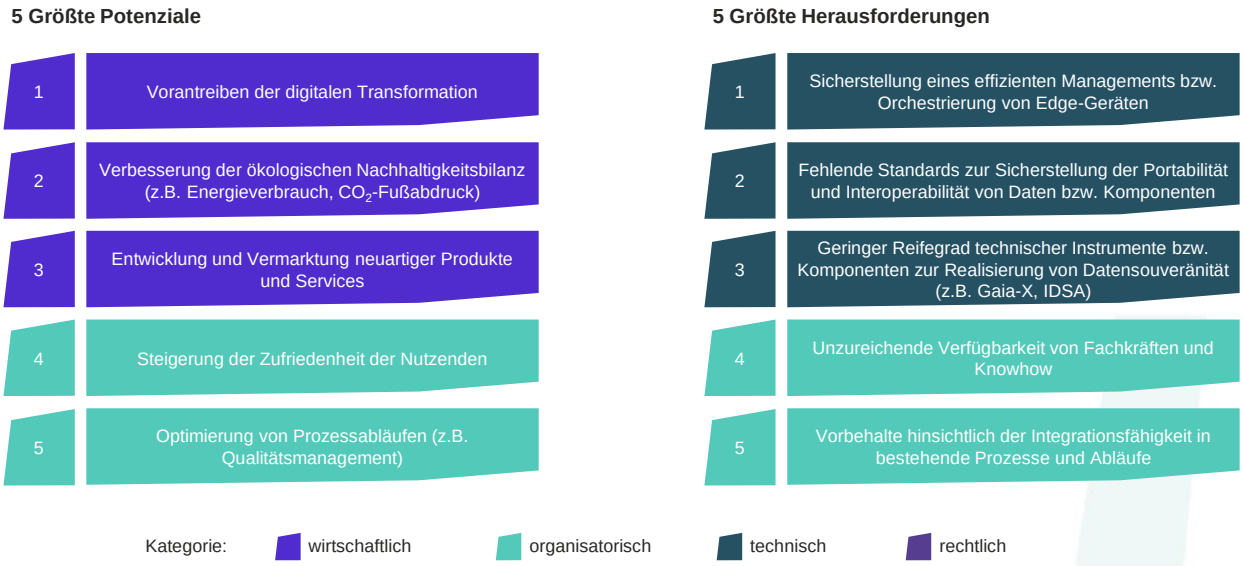


Abbildung 6: Größte Potenziale und Herausforderungen von Edge-Computing

4.1 Potenziale

Die Early-Adopters sehen allgemein wirtschaftliche Faktoren als höchste Potenziale eines Einsatzes von Edge-Computing an. Gefolgt werden diese von organisatorischen und rechtlichen Potenzialen. Rein technische Faktoren werden aus Sicht der Befragten insgesamt eher als nachrangig wichtige Motivationsfaktoren eingeschätzt. Abbildung 7 zeigt eine detaillierte Übersicht der Bewertung von möglichen Potenzialen des Einsatzes von Edge-Computing in Produkt- oder Serviceinnovationen aus Sicht von Early-Adopters.

Insgesamt bewerten die Befragten das Vorantreiben der digitalen Transformation, die Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsbilanz, die Entwicklung und Vermarktung neuartiger Produkte und Services, die Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden und die Optimierung von Prozessabläufen als die stärksten Potenziale eines Edge-Computing-Einsatzes. Gerade die ersten beiden Motive folgen aktuellen Megatrends mit Relevanz für nahezu alle Unternehmen. Im Folgenden werden die fünf genannten Top-Potenziale näher beschrieben und deren Implikationen für die Nutzenden und das Geschäftsumfeld genauer beleuchtet.

Abbildung 7: Bewertung der Potenziale des Einsatzes von Edge-Computing aus Sicht der Early-Adopters von Edge-Computing

Vorantreiben der digitalen Transformation

Das Vorantreiben der digitalen Transformation wurde unter den Early-Adopters als höchstes Potenzial des Einsatzes von Edge-Computing in ihren Anwendungsvorhaben identifiziert. Unter dem Begriff der digitalen Transformation wird üblicherweise die aktive disruptive Veränderung der Wirtschaft und Gesellschaft durch die Verwendung von digitalen Technologien verstanden (Pousttchi, 2019). Edge-Computing kann als eine dieser Technologien auf verschiedenen We-

gen die digitale Transformation für Anwenderunternehmen unterstützen. Edge-Computing-Anwendungen können die Struktur von Leistungserstellungsprozessen und deren finanzielle Aspekte in Unternehmen transformieren. Durch den Einsatz von Edge-Computing können interne Prozesse verbessert oder günstiger durchgeführt werden, indem beispielsweise vormals analoge Prozesse digitalisiert werden. Aber auch die Produkte, Dienstleistungen und Erlösmodelle eines Unternehmens können transformiert werden. Stereotypisch sind hier die diversen durch Edge-Computing ermöglichten Servitization-Modelle zu nennen. Nicht zuletzt kann sich durch die digitale Transformation auch die Interaktion mit den Kunden ändern. Beispielsweise werden durch Edge-Computing-Anwendungen neuartige, datenbasierte Interaktionen zwischen Anbietern und Kunden ermöglicht.

Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsbilanz

Die Möglichkeit, mittels Edge-Computing die ökologische Nachhaltigkeitsbilanz zu verbessern, wurde von den Befragten im Durchschnitt als zweitwichtigstes Potenzial eingestuft. Edge-Computing ermöglicht die Umsetzung von Anwendungen, die eine Reduktion des Energieverbrauchs herbeiführen. Dazu zählt beispielsweise die intelligente Steuerung von Anlagen mit fossilen Energieträgern (bspw. Heizungssystemen) (Kortum et al., 2023). Weiterhin kann die intelligente Verteilung von Daten mittels Edge-Computing den Verbrauch fossiler Primärenergie von IT-Architekturen im Vergleich zu Cloud-zentrierten Szenarien um bis zu 20% reduzieren (European Commission, 2023). Die Energieeinsparung erfolgt dabei vor allem aus der reduzierten Rechenlast und Netzwerkleistung bei geringerer Datenübertragung. Beispielsweise werden viel genutzte Daten näher beim Datenkonsumenten gespeichert, während weniger kritische und geringer genutzte Daten in der Cloud abgelegt oder bestimmte Rohdaten nach deren Analyse an der Edge gelöscht werden können. In diesem Zuge folgen auch wirtschaftliche Vorteile: Durch geringeren Datentransfer lassen sich Datenübertragungskosten reduzieren. Dies ist insbesondere für Telekommunikationsdienstleister relevant, die immer höhere Aufwände zur Aufrechterhaltung der vereinbarten Servicelevel tragen müssen. Zudem können auch Anwenderunternehmen von einer reduzierten Netzwerklast profitieren, da diese einen der größten Kostentreiber bei der Nutzung von Cloud-Services darstellen.

Entwicklung und Vermarktung neuartiger Produkte und Services

Der Einsatz von Edge-Computing zur Entwicklung und Vermarktung neuartiger Produkte und Services stellt ein weiteres entscheidendes wirtschaftliches Potenzial für den Einstieg in die Nutzung von Edge-Computing durch die befragte Stichprobe dar. Im Rahmen von Abschnitt 3 wurde bereits gezeigt, dass Edge-Computing hauptsächlich für neuartige Produkte und Services und weniger zur inkrementellen Verbesserung existierender Prozesse eingesetzt wird. Ein prägnantes Beispiel für die Entwicklung neuartiger Services mittels Edge-Computing ist im Anwendungsbeispiel „Edge-Cloud-Umgebung für Komponenten-Service-Systeme in der industriellen Produktion“ gezeigt. Die Edge-Cloud-Umgebung dient dabei als Plattform für verschiedene Services von Komponentenlieferanten wie beispielsweise Condition-Monitoring oder Predictive-Maintenance. In diesem Kontext sind auch neuartige Geschäfts- und Abrechnungsmodelle basierend auf dem Einsatz von Edge-Computing möglich. Prominentestes Beispiel sind hier die unter dem Begriff „Everything-as-a-Service“ bekannten Abrechnungsmodelle, bei denen ehemals kapitalintensive Investitionsgüter wie Produktionsmaschinen im Rahmen von leistungsbezogenen Abrechnungsmodellen zur Verfügung gestellt werden. Edge-Computing sorgt dabei für

die kontinuierliche Analyse abrechnungsrelevanter Parameter. Zusätzlich können Edge-Computing-Anwendungen durch Anwenderunternehmen selbst als Basis zur Entwicklung neuartiger Produkte und Services genutzt werden. So erhalten die Nutzenden von Edge-Computing-Anwendungen vereinfachten Zugriff auf die von ihnen erzeugten Daten, die an potenzielle Kunden weitergegeben werden können, beispielsweise um die Transparenz über Produkte und Prozesse zu erhöhen und die Einhaltung vereinbarter Vorschriften zu dokumentieren.

Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden

Als höchstes organisatorisches und nicht-wirtschaftliches Potenzial von Edge-Computing wurde von den Befragten die Möglichkeit zur Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden identifiziert. Basierend auf den hohen Anforderungen von Anwendungsnutzenden ist es für Anwendungsentwickelnden schwierig, zufriedenstellende Leistungen bereitzustellen. Typische Anforderungen von Nutzenden digitaler Services sind Geschwindigkeit, Unterbrechungsfreiheit, Personalisierung, Integration und vermehrt auch der Schutz der Privatsphäre beziehungsweise bei Unternehmen der Schutz von Geschäftsgeheimnissen. Edge-Computing-Anwendungen können durch die lokale Verarbeitung von Daten und die Einbindung weiterer Schlüsseltechnologien die Zufriedenheit der Nutzenden erhöhen. Beispielsweise werden im Rahmen der lokalen Datenverarbeitung die Geschwindigkeit von Services erhöht und die Servicequalität durch Vermeidung von Unterbrechungen gestärkt. Edge-Computing ermöglicht auch die Personalisierung von Diensten bei gleichzeitiger Einhaltung von Datenschutzrichtlinien. Ein konkretes Beispiel für die Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden wird im Anwendungsszenario „KI-basierte Optimierung von Heizplänen in Gebäudekomplexen“ in Abschnitt 3 vorgestellt. Dort sorgt die lokale KI-Analyse von Daten an der Edge für eine Heizungssteuerung, die das Wohlbefinden der Nutzenden im Vergleich zu herkömmlichen Steuerungssystemen deutlich erhöht.

Optimierung von Prozessabläufen

Ein weiterer wichtiger Motivationsfaktor zur Nutzung von Edge-Computing liegt für die befragten Early-Adopters im Einsatz von Edge-Computing zur Optimierung von Prozessabläufen. Die Fähigkeit, Kernprozesse in der Wertschöpfungskette eines Unternehmens kontinuierlich zu verbessern, wird als Operational-Excellence bezeichnet. Diverse Eigenschaften von Edge-Computing-Anwendungen ermöglichen diese Operational-Excellence: Durch die schnelle und zuverlässige Verarbeitung von Daten an der Edge, verbunden mit dem Einsatz von künstlicher Intelligenz und IoT, können vormals manuelle Prozesse entlang der Wertschöpfungskette automatisiert werden. Der Einsatz von Edge-Computing erhöht die Echtzeitfähigkeit von Steuerungssystemen und ermöglicht eine dezentrale Steuerung, z.B. in der industriellen Produktion oder in der Elektrizitätswirtschaft. Dabei ist eine Optimierung nicht nur hinsichtlich finanzieller, sondern auch hinsichtlich ökologischer Kennzahlen möglich. In Abschnitt 3 wurde im Anwendungsfall „Ökologische Optimierung der industriellen Fertigung mittels Edge-Computing und KI“ gezeigt, wie verschiedene Prozessparameter in industriellen Fertigungsprozessen unterstützt durch Edge-Computing optimiert werden können.

Besonderheiten: Datenverarbeitung bei geringer Netzabdeckung und DSGVO-Konformität nur als weniger relevante Treiber identifiziert

Die Befragung stellte auch einige überraschende Aspekte heraus. So bewerteten die Early-Adopters die Datenverarbeitung bei geringer Netzabdeckung, die Ermöglichung von effizienten

standort- bzw. gerätebezogenen Diensten sowie die DSGVO-konforme Verarbeitung personenbezogener Daten als die geringsten Motivationsfaktoren für den Einsatz von Edge-Computing. Ersteres steht im Gegensatz zu vorangegangenen Publikationen aus dem Umfeld der Hyperscaler, die eine Bearbeitung von Daten bei unsicherer Konnektivität als einen der Haupttreiber von Edge-Computing sehen (Noghabi et al., 2019). Die Bereitstellung von kontext- bzw. standortbezogenen Diensten wird ebenso häufig als hohes Potenzial von Edge-Computing-Anwendungen genannt (Ahmed et al., 2017). Allerdings existieren nur wenige Anwendungsfälle, in denen sich Geräte Edge-Computing-Rechenleistung flexibel teilen (Cyber-Foraging-Modell). Bei derzeitigen Edge-Computing-Anwendungsfällen handelt es sich vielmehr um ortsfeste und langlaufende Szenarien, sodass dieses Edge-Computing-Potenzial aktuell kaum ausgeschöpft wird. Auch die mit einer lokalen Verarbeitung der Daten einhergehende datenschutzkonforme Datenverarbeitung auf Edge-Computing-Devices wurde von den Befragten insgesamt nicht als primäre Motivation des Einsatzes von Edge-Computing eingestuft. Dieses Resultat sollte jedoch vorsichtig interpretiert werden, da nicht jedes Edge-Computing-Anwendungsvorhaben zwangsläufig mit personenbezogenen Daten arbeitet.

4.2 Herausforderungen

Insgesamt schätzen die Befragten technische Faktoren als höchste Herausforderung bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungen ein. An zweiter Stelle stehen organisatorische Herausforderungen. Rechtliche und auch wirtschaftliche Herausforderungen werden von den Befragten im Allgemeinen als eher gering eingeschätzt, wobei im rechtlichen Bereich spezifische Faktoren existieren, die als hohe Herausforderung gesehen werden. Eine detaillierte Übersicht der Bewertung von Herausforderungen bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungen bei Anwenderunternehmen ist in Abbildung 8 dargestellt.

Im Rahmen der Befragung wurden die Sicherstellung eines effizienten Gerätemanagements, fehlende Standards zur Sicherstellung von der Portabilität und Interoperabilität von Daten und Komponenten, der geringe Reifegrad technischer Instrumente und Komponenten zur Realisierung von Datensouveränität, die unzureichende Verfügbarkeit von Fachkräften und Knowhow und die Vorbehalte hinsichtlich der Integrationsfähigkeit in bestehende Prozesse und Abläufe als größte Herausforderungen bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungen durch die Early-Adopters identifiziert. Diese fünf genannten Herausforderungen werden folgend genauer beschrieben und untersucht.

Bewertung der Herausforderungen bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungsszenarien aus Sicht der Early-Adopters von Edge-Computing

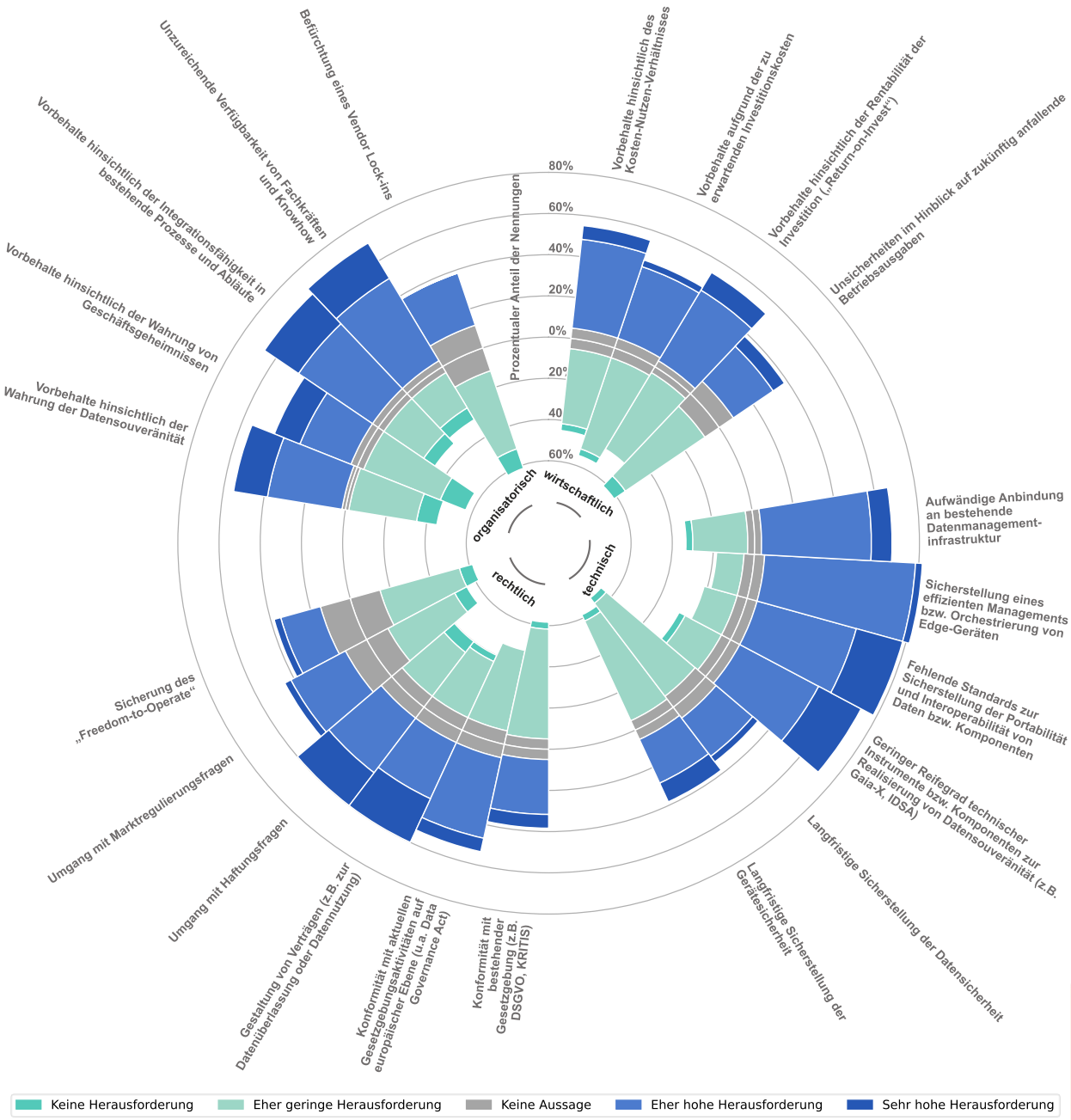


Abbildung 8: Bewertung der Herausforderungen bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungen durch die Anwenderunternehmen

Sicherstellung eines effizienten Managements bzw. Orchestrierung von Edge-Geräten

Die Sicherstellung des Gerätemanagements und der Geräteorchestrierung wurde als größte Herausforderung bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungen bei Anwenderunternehmen bewertet. Das Gerätemanagement umfasst auch Aufgaben wie die Konfiguration, Re-

gistrierung, Updates, Monitoring, die Deaktivierung und die Entfernung von Edge-Devices innerhalb des Gesamtsystems. Unter Orchestrierung wird die Koordinierung der Hardware- und Softwareelemente einer Edge-Computing-Anwendung verstanden.

In beiden Bereichen wird die Komplexität vor allem durch die verteilte Natur und die Heterogenität der Komponenten in Edge-Computing-Systemen hervorgerufen (ISO, 2020a). Beispielsweise sind ursprünglich einfachere Gerätemanagementaufgaben wie die Durchführung von Updates der Gerätesoftware nun deutlich anspruchsvoller, da sich eine Vielzahl von Geräten außerhalb des Einflussbereichs des Softwarelieferanten an Orten mit potenziell schlechter Netzwerkverbindung befinden können. Dennoch gilt es, diese notwendigen Services auch für die verteilten Geräte zuverlässig, ausfallsicher und ohne Beeinträchtigung des Gesamtsystems bereitzustellen (Linux Foundation, 2022). Im Bereich der Orchestrierung ist vor allem die Heterogenität von Hard- und Software im Spektrum von Edge zu Cloud ein herauffordernder Faktor. Aufgaben wie die die Zusammenführung von Diensten und Ressourcen, die Verteilung einzelner Dienste über verschiedene Ressourcen und die Anpassung der Orchestrierung bei sich ändernder Hardware oder Services müssen stärker als in herkömmlichen zentralen Systemgestaltungen während des Systemdesigns berücksichtigt werden.

Fehlende Standards zur Sicherstellung der Portabilität und Interoperabilität von Daten bzw. Komponenten

Als zweithöchste (technische) Hürde bei der Umsetzung ihrer Edge-Computing-Anwendungsvorhaben identifizieren die Early-Adopters die derzeit noch lückenhafte Landschaft an Standards für Interoperabilität und Portabilität. Interoperabilität bezeichnet die Fähigkeit, zwischen verschiedenen Geräten und Services zu kommunizieren. Mit Portabilität ist die Verschiebung von Daten und Services zwischen verschiedenen Infrastrukturkomponenten mit minimalen Unterbrechungen gemeint. Wie bereits zuvor beschrieben, herrscht im Edge-Computing eine hohe Heterogenität in den Bereichen Hardware, Software und Technologien. Um Skalierbarkeit und Wachstum von Edge-Computing-Anwendungen zu unterstützen, muss die Interoperabilität verwendeter Hard- und Softwarebausteine verschiedener Hersteller gewährleistet sein. Im Detail wird Interoperabilität insbesondere in den Bereichen Kommunikationsprotokolle, Identifizierung von Geräten, Nomenklatur und Definitionen sowie im Hinblick auf gemeinsame Datenformate benötigt. Portabilität wird beim Einsatz von Edge-Computing insbesondere benötigt, um entwickelte Services auf verschiedenen Edge-Computing-Geräten bei den Anwendern einzuführen und bei Bedarf Edge-Computing-Geräte austauschen zu können. Die Portabilität von Daten stellt mit Einführung des Data Act ebenso eine rechtliche Anforderung dar.

Derzeit stehen Standards zur Modellierung und Übertragung von Daten, wie beispielsweise OPC-UA oder die Verwaltungsschale der Plattform Industrie 4.0 in der industriellen Produktion, längst nicht für alle Domänen zur Verfügung. Neben der Verfügbarkeit von Standards ist deren Skalierbarkeit auf eine potenziell endlose Menge an Edge-Computing-Geräten ein Problem. Außerdem werden existierende Standards derzeit nicht von allen Komponentenherstellern oder Servicedienstleistern unterstützt. Ein zusätzliches Problem stellt die Interoperabilität von Standards selbst dar. Entsprechend müssen die Erstanwender hohe Aufwände zur Entwicklung eigener Modelle oder zur Erstellung von Brückentechnologien investieren, um Daten und Komponenten miteinander zu vernetzen.

Geringer Reifegrad technischer Instrumente bzw. Komponenten zur Realisierung von Datensouveränität

Einen weiteren hohen technischen Komplexitätsfaktor bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben sehen die Befragten in der technischen Umsetzung von Datensouveränität, da die derzeit angebotenen Instrumente oftmals noch einen geringen Reifegrad besitzen. Unter Datensouveränität wird die Fähigkeit des Datengebers verstanden, zu entscheiden, was mit den durch ihn erhobenen Daten geschieht. Dies schließt auch den Zeitraum nach der Weitergabe von Daten an Dritte mit ein. Datensouveränität ist eine wichtige Anforderung von Unternehmen bei der Nutzung digitaler Services, da Unternehmen befürchten, mit der Weitergabe ihrer Daten beispielsweise Geschäftsgeheimnisse oder personenbezogene Daten zu veröffentlichen. Eine so hohe Gewichtung dieser Herausforderung legt noch einmal die Wichtigkeit von Datensouveränität für deutsche Unternehmen bei der Realisierung von Anwendungsfällen in der Datenwirtschaft dar.

Zur Durchsetzung von Datensouveränität in Datenräumen werden in Initiativen wie den International Data Spaces oder Gaia-X technische und fachliche Instrumente konzipiert. Die Entwicklung der technischen Instrumente ist derzeit allerdings noch in Arbeit und wird insbesondere innerhalb von Open-Source-Initiativen unter dem Schirm der Eclipse Foundation vorangetrieben[3]. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie existieren nur wenige produktive Datenraum-initiativen, in denen diese Komponenten bereits Einsatz finden. Entsprechend fehlt es den Early-Adopters an Erfahrungsberichten und Implementierungshinweisen aus dem produktiven Einsatz. Beispielsweise ist unklar, welche Instrumente überhaupt zur Verfügung stehen und wie diese konkret im jeweiligen Anwendungsfall eingesetzt werden können.

Unzureichende Verfügbarkeit von Fachkräften und Knowhow

Die unzureichende Verfügbarkeit von Fachkräften mit Kompetenzen in Bereichen des Edge-Computings wurde durch die Befragten als größte nicht-technische Herausforderung bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungsfällen eingeschätzt. So handelt es sich bei Edge-Computing und vielen verbundenen Technologien (Cloud-Computing, IoT oder KI) um für die Industrie relativ neuartige Konzepte. Entsprechend sind Personen mit Spezialwissen zu Entwurf, Entwicklung und Betrieb von Edge-Computing-Lösungen noch rar. Konkret äußert sich dies in der schwierigen Akquise von Beschäftigten für die Umsetzung der Edge-Computing-Anwendungsvorhaben. Eine Unterbesetzung des Projektteams führt in der Folge zu Verzögerungen bei der Konzeptualisierung und Implementierung der Edge-Computing-Anwendungsvorhaben. Da aufgrund des Technologiemixes viele verschiedene Kompetenzen benötigt werden, sodass das entsprechende Knowhow zur Realisierung von Gesamtsystemen nur selten von einzelnen Organisationen erbracht werden kann, wird oftmals die Kollaboration mit Beratungsunternehmen und Servicedienstleistern notwendig.

Dieser Umstand passt zu einem Trend in der gesamten Informationstechnologie: So hat sich gemäß des Branchenverbands Bitkom der Fachkräftemangel in der IT seit einiger Zeit stetig verschärft. In 2022 fehlten „137.000 IT-Expertinnen und -Experten quer durch alle Branchen“ (Bitkom e.V., 2022). Zudem weist die Informatik im Vergleich mit anderen Branchen den höchsten Anteil an Stellen auf, die nicht besetzt werden konnten (Hickmann, 2022).

---

[3] Siehe https://projects.eclipse.org/projects/technology.edc und https://projects.eclipse.org/projects/technology.xfsc

Vorbehalte hinsichtlich der Integrationsfähigkeit in bestehende Prozesse und Abläufe

Eine weitere große organisatorische Herausforderung sehen die Early-Adopters in existierenden Vorbehalten hinsichtlich der Integrationsfähigkeit neuartiger Edge-Computing-Anwendungsvorhaben in bestehende Prozessabläufe. Bei der Realisierung von Edge-Computing-Anwendungen bei Anwenderunternehmen müssen in den meisten Fällen die existierende Infrastruktur und Arbeitsweisen mitberücksichtigt werden. Unternehmen verfügen üblicherweise bereits über Systemlandschaften, bestehend aus ERP-Systemen zur Steuerung der Geschäftsprozesse, CRM-Systemen zur Abwicklung der Kundenbeziehungen usw. Der Einsatz von neuartigen Edge-Computing-Anwendungen disruptiert vorhandene Arbeitsabläufe, die zuvor mithilfe der existierenden Systemlandschaft abgewickelt wurden. Oftmals werden nur spezifische Teilaufgaben durch die Edge-Computing-Anwendungen übernommen, sodass keine komplette Ablösung existierender Systeme stattfindet. Entsprechend ist es notwendig, dass die einzuführende Edge-Computing-Anwendung technisch, organisatorisch und kulturell in bestehende Prozesse und Abläufe eingebettet wird.

Bei der technischen Einbindung stellen insbesondere proprietäre Schnittstellen und Datenmodelle der verschiedenen Systeme eine Herausforderung dar. Die Prozessautomatisierung führt aus organisatorischer Sicht zu einem Wegfall oder einer Veränderung von Rollen und Tätigkeiten, sodass diese neu ausgelegt und geplant werden müssen. Das kann zu Akzeptanzproblemen des Personals führen, da sich Mitarbeitende in ihrer Rolle beschnitten sehen oder diese bisher nicht vorgesehene, neuartige Aufgaben ausführen müssen.

Besonderheiten: Geringe Befürchtungen vor Vendor-Lock-in und Verlust an Datensicherheit

Auf Basis der Befragung sind neben den als besonders heraufordernd eingeschätzten Faktoren auch Faktoren identifizierbar, die für die Early-Adopters keine oder nur eine geringe Herausforderung bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungen darstellen. Dazu gehören die Befürchtung eines Vendor-Lock-in durch die Nutzenden, die Sicherung eines Freedom-to-Operate sowie die langfristige Sicherstellung der Datensicherheit. Die ersten beiden Faktoren sind insofern überraschend, als dass gleichzeitig die Standards für Interoperabilität und Portabilität als unzureichend identifiziert wurden. Es kann daher gemutmaßt werden, dass Lock-in-Effekte im Bereich Edge-Computing derzeit im Gegensatz zu Cloud-Computing nur eine geringe Rolle bei Überlegungen der Early-Adopters hinsichtlich einer Einführung spielen. Sorgen über Datensicherheitsaspekte scheinen durch die lokale Bearbeitung der Daten für die Early-Adopters in den Hintergrund zu rücken, obwohl traditionelle Sicherheitsmechanismen im Bereich Edge-Computing durch die limitierte Rechenkapazität nur beschränkt eingesetzt werden können (Shi et al., 2016).

5 Handlungsempfehlungen zur Definition von Edge-Computing-Anwendungsfällen

Dieser Abschnitt leitet aus den Erfahrungen der Early-Adopters im Technologieprogramm Edge Datenwirtschaft Handlungsempfehlungen zur Definition von Edge-Computing-Anwendungsfällen ab. Dabei werden neben dem technischen Einsatz von Edge-Computing auch das zugehörige Geschäftsmodell und organisatorisch-kulturelle Aspekte bei der Entwicklung der Produkt- und Serviceinnovationen betrachtet.

Im Bereich „Planung und Entwurf von Innovationen“ sind aus konzeptioneller Perspektive die Schritte „Status-quo-Analyse“, „Ideengenerierung“ und „Machbarkeitsanalyse“ in der entsprechenden logischen Reihenfolge zu durchlaufen (Wirtz & Daiser, 2018). Einzelne Schritte können dabei rekursiv absolviert werden. Im Folgenden werden diese Planungs- und Entwurfsschritte fokussiert und Handlungsempfehlungen zur Bewältigung von spezifischen Anforderungen bei der Erstellung von neuen Edge-Computing-Anwendungsfällen in den jeweiligen Schritten gegeben. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht über die folgend beschriebenen Handlungsempfehlungen.

Abbildung 9: Handlungsempfehlungen zur Definition von Edge-Computing-Anwendungsfällen

Phase 1: Status-quo-Analyse

Zum Start der Anwendungsfallentwicklung muss der Status-quo im Hinblick auf das Unternehmen, die aktuellen Geschäftsmodelle und Produkte, die Zielgruppe und den Markt untersucht werden, um eine Übersicht über die Geschäftsumgebung zu erhalten. Dazu gehören insbesondere die Identifikation unausgeschöpfter Potenziale (intern oder bei Kunden) und die Analyse des Geschäftsökosystems. Als Ergebnis sollte das Unternehmen beziehungsweise das Projektteam ein umfassendes Verständnis über existierende Geschäftsmodelle und Prozesse und das Geschäftsumfeld besitzen.

Handlungsempfehlung A: Echtzeitanforderungen und sehr große Datenmengen als Startpunkt

Die physische Positionierung des Speichers und der Rechenleistung nahe am Punkt der Datenerzeugung stellt ein Schlüsselmerkmal von Edge-Computing dar. Die daraus folgenden technischen Potenziale wie die geringe Latenz bei der Datenanalyse und die lokale Verarbeitung von Daten wurden sowohl in der Literatur als auch in dieser Studie durch die Early-Adopter als wichtige Motivationsfaktoren für den Einsatz von Edge-Computing identifiziert. Edge-Computing kann also Anwendungsfälle ermöglichen, die zuvor aus technischer Sicht oder aufgrund hoher Kosten nicht umsetzbar waren.

Entsprechend sollten insbesondere solche Unternehmensbereiche als Einsatzgebiete von Edge-Computing betrachtet werden, in denen geringe Latenzen oder gar Echtzeitanforderungen sowie extreme Datenmengen die Nutzung herkömmlicher IT-Infrastrukturen, üblicherweise in der Cloud, ausschließen. Zu deren Identifizierung ist die Kollaboration zwischen technischen Rollen und Domänenexperten, wie beispielsweise dem Produktmanagement, notwendig. Dies kann beispielsweise über eine Analyse existierender Wertschöpfungsketten und der anfallenden und genutzten Daten innerhalb eines spezifischen Geschäftsbereichs geschehen. Im ersten Schritt werden dazu die existierenden Wertschöpfungsketten und ihre Prozessschritte dargestellt und Bedarfe an Informationen oder Entscheidungen aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die in den Prozessschritten verfügbaren Daten identifiziert und deren Reifegrad bewertet (s. dazu beispielsweise (Stahl et al., 2023)). Durch die Zusammenführung von Informationsbedarfen und verfügbaren Daten lassen sich anschließend Stellen identifizieren, an denen Anforderungen an niedrige Latenzen oder die Verarbeitung großer Datenmengen existieren, die mit der bisher eingesetzten IT-Infrastruktur nicht erfüllt werden können.

Handlungsempfehlung B: Nachhaltigkeitsaspekte als Treiber berücksichtigen

Historisch gesehen werden bei der Anwendungsfallentwicklung und -analyse hauptsächlich finanzielle Kennzahlen wie die Produktivität oder die Kapitalrendite berücksichtigt. Inzwischen stehen Anwendungsfälle und Wertversprechen durch die steigende Relevanz von Nachhaltigkeits- und Sozialaspekten (ESG) in der Industrie, durch Regulierung und auch für die Gewinnung von Investoren jedoch vor neuen Herausforderungen (Pieroni et al., 2019). Insbesondere arbeiten Unternehmen auf eine Entkopplung von Wertschöpfung und Ressourcenverbrauch hin. Dies zeigte sich auch in der zu dieser Studie durchgeführten Umfrage, in der die Befragten die Verbesserung von Nachhaltigkeitsaspekten als insgesamt zweithöchste Motivation für den Einsatz von Edge-Computing bewerteten.

Aufgrund der steigenden Relevanz sozialer und Nachhaltigkeitsfaktoren bei der Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen und den Potenzialen von Edge-Computing, sollte diesen Kriterien bei der Entwicklung von Edge-Computing-Anwendungsfällen eine höhere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Einbindung von Nachhaltigkeitskriterien kann bereits in der Status-quo-Analyse zur Identifizierung existierender Schwachstellen bzw. Verbesserungspotenziale führen. Verschiedene Tools sind zur Analyse existierender Geschäftsmodelle hinsichtlich ESG-Kriterien verfügbar (Bhatnagar et al., 2022). Grundlegend ist, die Ausgangssituation nicht ausschließlich auf Basis monetärer Kennzahlen, sondern basierend auf multiplen Kriterien (Multi-Criteria-Decision-Making) zu bewerten. Dabei müssen zunächst die zu analysierenden Nachhaltigkeitsdimensionen festgelegt und anschließend Metriken zu deren Bewertung definiert werden. Zur Identifikation von Nachhaltigkeitsdimensionen können die Sustainable-Development-Goals der Vereinten Nationen herangezogen werden. Spezifische Metriken können dann in Abhängigkeit vom eigentlichen Anwendungsfall abgeleitet werden. Derartige Metriken sind beispielsweise der Gesamtenergieverbrauch oder die Produkteinsatzdauer. Dabei ist es wichtig, einen ganzheitlichen (systemischen) Ansatz für die Analyse zu wählen, der auch Externalitäten umfasst. Oftmals ist die Analyse des Gesamtlebenszyklus eines Produkts oder Services ein nützlicher Startpunkt.

Phase 2: Ideengenerierung

Basierend auf der Analyse der Ist-Situation definiert das Unternehmen in der zweiten Phase die Vision und die Bestandteile des Anwendungsvorhabens. Dies kann mithilfe der Entwicklung von User-Stories oder User-Szenarios und unter Einbezug von Kreativitätstechniken wie dem Design-Thinking geschehen. Neue Ideen können nicht nur aus den Potenzialen des Einsatzes von Edge-Computing, sondern auch aus Herausforderungen im Rahmen existierender Geschäftsmodelle generiert werden. Als Ergebnis dieser Phase sollten ein oder mehrere vielversprechende Anwendungsvorhaben auf konzeptioneller Ebene definiert sein.

Handlungsempfehlung C: Kooperationspartner bereits in die Ideengenerierung einbeziehen

Wie bereits in vorangegangenen Studien (Gole et al., 2023) gezeigt, bestätigen auch die Ergebnisse dieser Kurzstudie, dass nur sehr wenige Unternehmen über Kompetenzen in allen für Edge-Computing-Anwendungen relevanten Bereichen verfügen. Dazu gehören die Bereiche Hardware, Software, Kommunikationstechnologie und Services. Zusätzlich sind oft Kenntnisse in spezialisierten Bereichen wie KI, DLT oder digitalen Zwillingen notwendig, um einzelne Aspekte der Edge-Computing-Anwendungsvorhaben umzusetzen. Durch den Fachkräftemangel und die allgemein geringe Kompetenz im Bereich Edge-Computing sind insbesondere weniger digitalisierte, traditionelle KMU nicht in der Lage, Edge-Computing-Anwendungen in Eigenregie umzusetzen.

Entsprechend müssen potenzielle Kooperationspartner bereits früh in die Anwendungsfallentwicklung einbezogen werden. Dazu sollten zunächst die Kompetenzbedarfe ermittelt werden. Zur systematischen Festlegung benötigter externer Kompetenzen kann beispielweise auf Fähigkeitslandkarten aus dem Bereich des Enterprise-Architecture-Managements zurückgegriffen werden. Darin werden benötigte Fähigkeiten zur Realisierung von Edge-Computing-Anwendungsfällen definiert und entlang der Kernfunktionen oder Wertschöpfungskette strukturiert. Ein Unternehmen bewertet anschließend den individuellen Reifegrad hinsichtlich dieser Fähigkeiten, um potenzielle Kenntnisbedarfe zu identifizieren. Anhand der Bedarfe können dann Partner im Firmennetzwerk, auf Messen oder durch Recherchen identifiziert, evaluiert und zur Zusammenarbeit ausgewählt werden. Vor der Zusammenarbeit sollten Regelungen wie Vertraulichkeits- oder Partnerschaftsvereinbarungen getroffen werden, um weitergegebene Informationen zu schützen und den Umgang mit geistigem Eigentum zu regeln.

Zur kollaborativen Ideenfindung sind schlussendlich verschiedene Methoden denkbar, von denen drei folgend kurz dargestellt werden. *Design-Thinking* ist eine Problemlösungsmethode, die darauf abzielt, innovative Lösungen mit Fokus auf die Bedürfnisse und Perspektiven der Nutzer zu entwickeln. Der Prozess umfasst Phasen wie Verstehen, Beobachten, Ideen generieren, Prototypen erstellen und Testen, wodurch iterative Schleifen entstehen, um nutzerzentrierte Lösungen zu gestalten. Hier können zur Ideenfindung insbesondere die ersten drei Phasen durchlaufen werden. Eine weitere Kreativitätsmethodik stellt *SCAMPER* dar: Dabei wird ein bestehendes Geschäftsmodell oder eine vorhandene Idee durch verschiedene Fragestellungen und Blickwinkel analysiert. Jeder Buchstabe des Akronyms bezieht sich auf eine bestimmte Aktivität: *S*ubstitute (Ersetzen), *C*ombine (Kombinieren), *A*dapt (Anpassen), *M*odify (Modifizieren), *P*ut-to-another-use (Umwidmen), *E*liminate (Eliminieren) und *R*everse (Umkehren). SCAMPER kann dabei helfen, existierende Geschäftsmodelle durch den Einsatz von Edge-Computing zu verbessern oder bestehende Edge-Computing-Anwendungsfälle auf den domänenspezifischen Kontext anzupassen. Eine dritte Kreativitätsmethodik stellt *Brainwriting* dar. Bei dieser Methode

schreiben Teammitglieder ihre Ideen auf, anstatt sie mündlich zu äußern. Die geschriebenen Ideen werden dann in der Gruppe weitergegeben, und die anderen Teilnehmer können die vorhandenen Ideen lesen und durch Ergänzungen oder Modifikationen erweitern. Diese Methode fördert eine breite Beteiligung und verhindert, dass dominante Charaktere das Geschehen in einer kollaborativen Arbeit bestimmen.

Handlungsempfehlung D: Lösungen verbundener Domänen als Inspiration nutzen

Im Gegensatz zu den meist generisch entworfenen Cloud-Computing-Services, die im Rahmen eines Anwendungsvorhabens auf die domänenspezifischen Bedürfnisse angepasst oder erweitert werden, existieren im Bereich Edge-Computing viele Anbieter mit domänenspezifischen Lösungen. Dazu gehören insbesondere Anbieter spezialisierter Hardware, wie beispielsweise Sensorik, oder Anbieter domänenspezifischer KI-Anwendungen. Diese Anbieter verfügen über Spezialwissen in den jeweiligen Bereichen. Allerdings sind sie nur bedingt in der Lage, existierende Anwendungen auf andere Domänen zu übertragen, da sie nicht über ausreichende Marktkenntnisse verfügen, beschränkte Ressourcen zur Umsetzung besitzen oder regulatorische Hürden befürchten.

Daher sollte im Rahmen der Ideengenerierung ein besonderes Augenmerk auf bereits existierende Edge-Computing-Anwendungen in verwandten Domänen geworfen und diese hinsichtlich der Adaptierbarkeit auf die eigene Domäne geprüft werden. Beispielsweise können Hardwarekomponenten, die ursprünglich auf einen spezifischen Anforderungsbereich ausgelegt waren, oft in Umgebungen mit ähnlichen Anforderungen eingesetzt werden. Die Adaption von existierenden Standards über Grenzen einzelner Domänen hinweg ermöglicht eine verbesserte Interoperabilität von Edge-Computing-Anwendungen. Zur Identifizierung von Lösungen verwandter Domänen eignen sich Verfahren der Umweltanalyse, der Besuch von Messen und Konferenzen und der regelmäßige Austausch mit Domänenexperten. Sind relevante Lösungen identifiziert, können Use-Case-Mapping-Verfahren genutzt werden, um existierende Anwendungsfälle zu beschreiben und notwendige Veränderungen zu skizzieren und somit eine angepasste Lösung zu entwerfen. Hier zeigt sich der Vorteil einer modularen Gestaltung von Edge-Computing-Lösungen: Sie sind einfacher auf einen anderen Kontext applizierbar und können damit eine potenziell größere Kundenbasis erreichen.

Handlungsempfehlung E: Relevante Stakeholder frühzeitig integrieren

Die Integrationsfähigkeit neuer Edge-Computing-Anwendungsvorhaben wurde durch die Early-Adopters sowohl aus technischer als auch aus organisatorischer Perspektive als eine der größten Herausforderungen bei der Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben identifiziert. Einerseits ändern sich durch neuartige Verfahren organisatorische Abläufe, andererseits werden umfassendere Mengen an Informationen über Prozesse gewonnen, die es in die existierende Unternehmensdateninfrastruktur zu integrieren gilt, um weiterführende Services zu entwickeln. Während die Akzeptanzproblematik vor allem aus organisatorischer und kultureller Perspektive angegangen werden musss, wird zur Integration in die Dateninfrastruktur auch technische Kompetenz benötigt.

Daher gilt es, insbesondere bei unternehmensinternen Geschäftsmodellinnovationen mittels Edge-Computing, notwendige Stakeholder frühzeitig in die Geschäftsmodellentwicklung mit einzubeziehen. Zu den relevanten Personengruppen zählen das Führungspersonal, die zukünftigen Nutzer sowie die Betreiber der existierenden IT-Infrastruktur. Eine frühzeitige Einbindung

der Führungsebene kann die Ausrichtung der Edge-Computing-Innovation an der Unternehmensstrategie und den Organisationszielen unterstützen. Ein Bekenntnis des Führungspersonals zum Edge-Computing-Innovationsprojekt unterstreicht zudem die Wichtigkeit des Innovationsvorhabens für das Unternehmen. Darüber hinaus sorgt die Führungsebene für die Bereitstellung von Budgets und Personal zur Durchsetzung des Vorhabens. So gaben im Jahr 2022 38% der befragten Unternehmen an, dass die Entscheidungen zur Umsetzung von Edge-Computing-Anwendungsvorhaben von der C-Suite getroffen wurden (Eclipse Foundation, 2023). Eine Einbindung von Betreibern der IT-Infrastruktur bei unternehmensinternen Innovationen stellt sicher, dass existierende Entwicklungsstandards (beispielsweise hinsichtlich von Datenformaten oder bei der Nutzung von Open-Source-Software) eingehalten werden und die erhobenen Daten auch für weitere Anwendungsfälle zur Verfügung stehen. Nicht zuletzt sollten auch zukünftige Nutzer frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Ein Einbezug bereits im Rahmen der Ideenfindung ermöglicht eine nutzendenzentrierte Entwicklung, eine erhöhte Akzeptanz der Lösung sowie die Sichtbarkeit möglicher ethischer Implikationen der Anwendungsfallinnovation. Bei letzterem wären etwa Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes oder der Automatisierung von Tätigkeiten zur Produktivitätssteigerung denkbar. Während sich interne Kunden einfach in bestehende Ideenfindungsprozesse integrieren lassen, bieten sich für externe Kunden dedizierte Mechanismen wie beispielsweise Co-Creation-Workshops oder Customer-Advisory-Boards an.

Phase 3: Machbarkeitsanalyse

Im Rahmen der Machbarkeitsanalyse erfolgt die Evaluation einer oder mehrerer in der vorangegangenen Phase entworfener Anwendungsfälle, die nun hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit aus technischer und ökonomischer Sicht geprüft werden. Weiterhin sind Elemente wie Umwelt- und Marktanalysen in diesem Schritt denkbar. Im Fokus stehen hier im Gegensatz zum ersten Schritt die geplanten Anwendungsszenarien und deren ökonomisches Potenzial. Als Ergebnis dieser Phase sollte eine fundierte Entscheidung hinsichtlich der Weiterverfolgung der Anwendungsfallinnovation getroffen werden, die auf technischen, ökonomischen und sonstigen Kriterien basiert.

Handlungsempfehlung F: Evaluation der Gesamtbetriebskosten

Stetig wachsende Datenmengen führen bei den Unternehmen zu immer höheren Ausgaben für die IT-Infrastruktur. Aus diesem Grund ist mit „FinOps“ eine neue Disziplin entstanden, die darauf abzielt, im Unternehmen den maximalen Nutzen aus Cloud-Computing zu ziehen. Konkret ermöglicht FinOps die Transparenz von Cloud-Service-Kosten für Finanzabteilungen und Entwicklung und die darauf basierende Optimierung der Cloud-Nutzung. FinOps betrachtet derzeit jedoch hauptsächlich operative Ausgaben durch Nutzung von Public Cloud-Services. Die Einführung von Edge-Computing-Anwendungen ist hingegen oft mit initialen Kapitalausgaben verbunden. Laufende Betriebs- und Servicekosten werden vernachlässigt. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Edge-Computing-Anwendungsvorhabens, das zumeist verschiedene Elemente entlang des Edge-Cloud-Kontinuums umfasst, müssen beide Perspektiven berücksichtigt werden, um die Gesamtbetriebskosten mit den erwarteten monetären Gewinnen gegenüber stellen zu können.

Zur ganzheitlichen Prognose der Kosten durch die Einrichtung und den Betrieb der Gesamtlösung sollten alle entlang des Edge-Cloud-Kontinuums anfallenden Kosten in die Kostenabschätzung mit einbezogen werden. Dazu gehören u.a. Kosten für die Infrastruktur, den Speicher, Datentransfers und Netzwerk, die Bereitstellung, Einrichtung und Wartung der Edge-Hardware sowie Kosten für die Nutzung von Drittanbietersoftware. Die anfallenden Kosten sind über den gesamten Lebenszyklus der Anwendungen hinweg zu prognostizieren. Eine genaue Analyse der Kosten hilft anschließend dabei, verschiedene Designoptionen des Anwendungsfalls gegenüberzustellen und auf Basis finanzieller Kriterien zu evaluieren. So kann auf Basis des Assessments bewertet werden, an welchen Stellen aus finanzieller Sicht Daten in die Cloud transferiert werden sollten und wo es besser ist, diese lokal zu speichern. Darüber hinaus gibt die Gesamtkostenkalkulation Hinweise auf die Gestaltung zukünftiger Preismodelle. So sind bei üblicherweise anvisierten „pay-as-you-go“-Preismodellen die Kapitalkosten in leistungsbezogene Kosten zu transformieren. Werden durch Edge-Computing-Anwendungsvorhaben existierende Prozesse signifikant verändert, sollte auch die gegebenenfalls möglich werdende Reduktion von Personalbindung in die Kostenkalkulation mit einbezogen werden.

Handlungsempfehlung G: Frühzeitige Evaluation der rechtlichen Perspektive

Im Rahmen der Entwicklung und des Betriebs von Edge-Computing-Geschäftsmodellen sind eine Reihe von rechtlichen Vorgaben zu erfüllen. Dazu gehören die Sicherstellung des „Freedom-to-operate“ durch die Sicherstellung, dass kein existierendes geistiges Eigentum verletzt wird. Werden personenbezogene oder personenbeziehbare Daten erfasst, so sind die gelten-

den Datenschutzvorschriften einzuhalten. Zukünftig werden mit Einführung des Data Act zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Verfügbarmachung von in Edge-Computing-Anwendungen erhobenen Daten gestellt. Auch Haftungsfragen beim Einsatz der Anwendungen und der Nutzung von (u.a.) künstlicher Intelligenz müssen geklärt werden. Zusätzlich können domänenspezifische Vorschriften, wie etwa im Bereich kritischer Infrastrukturen oder der Gesundheitswirtschaft, applizierbar sein. Eine Nichtbeachtung dieser Vorgaben während der Evaluation kann unter Umständen zu initial nicht vorgesehenen Kosten, Projektverzögerungen oder in schwerwiegendsten Fällen zum Abbruch des Innovationsprojekts führen.

Entsprechend sollten rechtliche Aspekte frühzeitig in der Innovationsphase berücksichtigt werden. Allerdings ist zu beachten, dass vor Einbezug kostspieliger Rechtsexperten bereits eine gewisse Konkretisierung der Geschäftsmodelle vorhanden sein muss, um eine zielführende rechtliche Beratung zu ermöglichen. Daher bietet sich an, interne (sofern verfügbar) oder externe Rechtsberatung im Rahmen der Evaluationsphase zu integrieren. Zu Beginn einer Rechtsprüfung werden die relevanten Gesetze und Vorschriften identifiziert. Dabei sind sowohl industriespezifische als auch allgemeine Vorschriften wie Vertrags- und Wettbewerbsrecht sowie Datenschutz- und Datensicherheitsvorschriften zu beachten. Anschließend ist das anvisierte Edge-Computing-Geschäftsmodell aus juristischer Perspektive zu beschreiben, um ein gemeinsames Verständnis über den Sachbestand zu erlangen. Darauf aufbauend kann die eigentliche Analyse und Abschätzung rechtlicher Risiken erfolgen. Neben der Risikoabschätzung als Beitrag zur Machbarkeitsanalyse kann die rechtliche Evaluation ausarbeiten, ob weitere juristische Maßnahmen, wie beispielsweise die Erstellung von zusätzlichen Vertragswerken für den Produktiven Einsatz des Edge-Computing-Anwendungsfalls, notwendig sind.

6 Literaturverzeichnis

3DS Outscale, Airbus, Amadeus, Aruba, Atos, Capgemini, CloudFerro, DE-CIX, Deutsche Telekom, Ericsson, German Edge Cloud, GIGAS, Indra, IONOS, IRIDEOS, Leaseweb Global, Magic Cloud, Nabiax, Nokia, . . . Telecom Italia (Hrsg.). (2021). *European industrial technology roadmap for the next generation cloud-edge offering*. https://ec.europa.eu/newsroom/repository/document/2021-18/European_CloudEdge_Technology_Investment_Roadmap_for_publication_pMdz85DSw6nqPppq8hE9S9RbB8_76223.pdf

Ahmed, E., Ahmed, A., Yaqoob, I., Shuja, J., Gani, A., Imran, M. & Shoaib, M. (2017). Bringing Computation Closer toward the User Network: Is Edge Computing the Solution? *IEEE Communications Magazine*, *55*(11), 138–144. https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700120

Azcoitia, S. A. & Laoutaris, N. (2022). A Survey of Data Marketplaces and Their Business Models. *ACM SIGMOD Record*(51).

Azkan, C., Spiekermann, M. & Goecke, H. (2019). Uncovering Research Streams in the Data Economy Using Text Mining Algorithms. *Technol. Innov. Manag. Rev.*(11), 62–75.

Bhatnagar, R., Keskin, D., Kirkels, A., Romme, A. G. L. & Huijben, J. (2022). Design principles for sustainability assessments in the business model innovation process. *Journal of Cleaner Production*, *377*, 134313. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134313

Bitkom e.V. (2022). *Trotz Krieg und Krisen: In Deutschland fehlen 137.000 IT-Fachkräfte | Presseinformation | Bitkom e. V.* https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutschland-fehlen-137000-IT-Fachkraefte#_

Büchel, J. & Engels, B. (2022). *Viele Unternehmen sind nicht bereit für die Datenwirtschaft: IW-Kurzbericht 96/2022*. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Data_Economy_Readiness.pdf

Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V. (Hrsg.). (2018). *Data Economy: Datenwertschöpfung und Qualität von Daten*. https://www.bvdw.org/fileadmin/bvdw/upload/publikationen/data_economy/ BVDW_Datenwertschoepfung_2018.pdf

Curry, E., Metzger, A., Zillner, S., Pazzaglia, J.-C. & García Robles, A. (Hrsg.). (2021). *The Elements of Big Data Value: Foundations of the Research and Innovation Ecosystem* (1st ed. 2021). Springer International Publishing; Imprint Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68176-0

Demchenko, Y., Los, W. & Laat, C. de (2018). Data as economic goods: Definitions, properties, challenges, enabling technologies for future data markets. *ITU Journal: ICT Discoveries*, *2*(23).

Eclipse Foundation (Hrsg.). (2023). *2022 IoT & Edge Commercial Adoption Survey Report*. https://outreach.eclipse.foundation/iot-edge-commercial-adoption-2022

El-Sheimy, N. & Li, Y [You] (2021). Indoor navigation: state of the art and future trends. *Satellite Navigation*, *2*(1). https://doi.org/10.1186/s43020-021-00041-3

Engels, B. (2017). Detours on the Path to a European Big Data Economy. *Intereconomics*, *52*(4), 213–216. https://doi.org/10.1007/s10272-017-0677-4

Engels, B. (2019). Data Governance as the Enabler of the Data Economy. *Intereconomics*, *54*(4), 216–222. https://doi.org/10.1007/s10272-019-0827-y

European Commission (Hrsg.). (2023). *Study on the Economic Potential of Far Edge Computing in the Future Smart Internet of Things: Final Study Report*. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff35c457-8f3b-11ee-8aa6-01aa75ed71a1/language-en

Fraunhofer ISST (Hrsg.). (2022). *Anreizsysteme und Ökonomie des Data Sharings: Handlungsfelder des unternehmensübergreifenden Datenaustausches und Status quo der deutschen Wirtschaft*. www.ieds-projekt.de

Fraunhofer ISST (Hrsg.). (2023). *Anreizsysteme und Ökonomie des Data Sharing: Status Quo der deutschen Datenwirtschaft und Anwendung von unternehmensübergreifendem Datenaustausch*. www.ieds-projekt.de

Gadekallu, T. R., Pham, Q.-V., Nguyen, D. C., Maddikunta, P. K. R., Deepa, N., Prabadevi, B., Pathirana, P. N., Zhao, J. & Hwang, W.-J. (2022). Blockchain for Edge of Things: Applications, Opportunities, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *9*(2), 964–988. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3119639

Giehl, A., Heinl, M. P. & Busch, M. (2021). Leveraging Edge Computing and Differential Privacy to Securely Enable Industrial Cloud Collaboration Along the Value Chain. In *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): 23-27 Aug. 2021* (S. 2023–2028). IEEE. https://doi.org/10.1109/CASE49439.2021.9551656

Gole, J., Zborowska, E. & Rotaru, A. (2023). *Cloud-Edge-IoT Demand Landscape.* https://doi.org/10.5281/zenodo.7821329

Groshev, M., Baldoni, G., Cominardi, L., La Oliva, A. d. & Gazda, R. (2023). Edge robotics: are we ready? an experimental evaluation of current vision and future directions. *Digital Communications and Networks*, *9*(1), 166–174. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.04.032

Hickmann, H. (2022). Die Berufe mit den aktuell größten Fachkräftelücken. *IW-Kurzbericht*, Artikel 67. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Top-Fachkr%C3%A4ftel%C3%BCcken.pdf

ISO (02-2020a). *ISO/IEC TR 23188:2020: Information technology — Cloud computing — Edge computing landscape*.

ISO (07-2020b). *ISO 22739:2020: Blockchain and distributed ledger technologies — Vocabulary*.

ISO (03-2023). *ISO 37184:2023: Sustainable mobility and transportation — Framework for transportation services by providing meshes for 5G communication*.

ISO/IEC (08-2020). *ISO/IEC 21836:2020: Information technology — Data centres — Server energy effectiveness metric*.

Jain, K. & Mohapatra, S. (2019). Taxonomy of Edge Computing: Challenges, Opportunities, and Data Reduction Methods. In F. Al-Turjman (Hrsg.), *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing Ser. Edge Computing: From Hype to Reality* (S. 51–69). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99061-3_4

Khan, W. Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I. & Ahmed, A. (2019). Edge computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, *97*, 219–235. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.050

Kortum, H., Hagen, S., Eleks, M., Rebstadt, J., Remark, F., Lowin, M., Wilson, C. M., Eberhardt, B., Roß, A., Maihöfner, D., Hinz, O. & Thomas, O. (2023). SECAI – Sustainable Heating through Edge-Cloud-based AI Systems. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, *60*(4), 850–871. https://doi.org/10.1365/s40702-023-00988-8

Koutroumpis, P., Leiponen, A. & Thomas, L. D. W. (2020). Markets for data. *Industrial and Corporate Change*, *29*(3), 645–660. https://doi.org/10.1093/icc/dtaa002

Krishnasamy, E., Varette, S. & Mucciardi, M. (2020). *Edge Computing: An Overview of Framework and Applications*. https://orbilu.uni.lu/handle/10993/46573

Lauf, F., Scheider, S., Bartsch, J. & Herrmann, P. (2022). Linking Data Sovereignty and Data Economy: Arising Areas of Tension. *International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI) 2022*. https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1023&context=wi2022

Legner, C., Pentek, T. & Otto, B. (2020). Accumulating Design Knowledge with Reference Models: Insights from 12 Years' Research into Data Management. *Journal of the Association for Information Systems*, *21*(3), 735–770. https://doi.org/10.17705/1jais.00618

Linux Foundation (Hrsg.). (2022). *State of the Edge 2022*. https://stateoftheedge.com/reports/state-of-the-edge-report-2022/

Machado, I. A., Costa, C. & Santos, M. Y. (2022). Data Mesh: Concepts and Principles of a Paradigm Shift in Data Architectures. *Procedia Computer Science*, *196*, 263–271. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.013

Marcham, A. (2021). *Understanding infrastructure edge computing: Concepts, technologies and considerations*. Wiley.

Muhic, M. & Bengtsson, L. (2021). Dynamic capabilities triggered by cloud sourcing: a stage-based model of business model innovation. *Review of Managerial Science*, *15*(1), 33–54. https://doi.org/10.1007/s11846-019-00372-1

Munn, L. (2020). Staying at the Edge of Privacy: Edge Computing and Impersonal Extraction. *Media and Communication*, *8*(2), 270–279. https://doi.org/10.17645/mac.v8i2.2761

Noghabi, S. A., Cox, L., Agarawal, S. & Ananthanarayanan, G. (2019). The Emerging Landscape of Edge Computing. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 11–20.

Otto, B., Hompel, M. ten & Wrobel, S. (Hrsg.). (2022). *Designing Data Spaces: The Ecosystem Approach to Competitive Advantage* (1st ed. 2022). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5

Pieroni, M. P., McAloone, T. C. & Pigosso, D. C. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, *215*, 198–216. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.036

Pousttchi, K. (2019). Digitale Transformation. In *Gronau, Norbert ; Becker, Jörg ; Kliewer, Natalia ; Leimeister, Jan Marco ; Overhage, Sven (Herausgeber): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online-Lexikon.* Berlin : GITO. https://wi-lex.de/index.php/lexikon/technologische-und-methodische-grundlagen/informatik-grundlagen/digitalisierung/digitale-transformation/

Rohde, M., Bogenstahl, C., Temme, F., Saive, D. & Schlunder, P. (2023). *Wert aus Unternehmensdaten schöpfen: Vom Pilotprojekt zum erfolgreichen Produktivbetrieb*. https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/SDW/2023_08_02_Leitfaden_Wie_l%C3%A4sst_sich_Wert_aus_Unternehmensdaten_sch%C3%B6pfen.html

Rohde, M., Bürger, M., Peneva, K. & Mock, J. (Hrsg.). (2022). *Datenwirtschaft und Datentechnologie: Wie aus Daten Wert entsteht*. Springer Vieweg. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-65232-9

Rohde, M., Eisenträger, M., Wittenbrink, N., Straub, S. & Gabriel, P. (2022). *Datenqualität und Qualitätsmetriken in der Datenwirtschaft*. https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2022/11/Datenqualitaet-und-Datenmetriken_iit-Studie_2022.pdf

Röhl, K.-H., Bolwin, L. & Hüttl, P. (2021). *Datenwirtschaft in Deutschland: Wo stehen die Unternehmen in der Datennutzung und was sind ihre größten Hemmnisse?* https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Hemmnisse_der_Datenwirtschaft_Studie.pdf

Shahzadi, S., Iqbal, M., Dagiuklas, T. & Qayyum, Z. U. (2017). Multi-access edge computing: open issues, challenges and future perspectives. *Journal of Cloud Computing*, *6*(1). https://doi.org/10.1186/s13677-017-0097-9

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y [Youhuizi] & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *3*(5), 637–646. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198

Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Corchado, J. M., Rodríguez-González, S. & Casado-Vara, R. (2019). A review of edge computing reference architectures and a new global edge proposal. *Future Generation Computer Systems*, *99*, 278–294. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.04.016

Spiekermann, M. (2019). Chancen und Herausforderungen in der Datenökonomie. *AUS POLITIK UND ZEITGESCHICHTE*, *69*(24-26), 16–21. https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/APuZ_2019-24-26_online.pdf

Stahl, T., Wurst, F. & Huber, M. (2023). Evaluation von Data Analytics Anwendungsfällen/Identification and evaluation of data-based use cases for assembly – Evaluation of Data Analytics Use Cases. *wt Werkstattstechnik online*, *113*(03), 107–113. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-41

Straßburg, S. & Beckmann, H. (2022). Datenwirtschaft und Datenwertschöpfungsketten – Eine systematische Übersicht. *Wirtschaftsinformatik 2022 Proceedings*. https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1134&context=wi2022

van der Meulen, R. (2018). *What Edge Computing Means for Infrastructure and Operations Leaders*. https://www.gartner.com/smarterwithgartner/what-edge-computing-means-for-infrastructure-and-operations-leaders

VDI-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.). (2021). *Future Data Assets: Welchen Wert haben technische Daten in Bilanzen?* https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/future-data-assets

Wirtz, B. & Daiser, P. (2018). Business Model Innovation Processes: A Systematic Literature Review. *Journal of Business Models*, *6*(1), 40–58.

7 Anhang

A: Erläuterung der Potenziale und Herausforderungen

Potenzial	Typ	Beschreibung
Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Handlungsfähigkeit (z.B. durch erhöhte Resilienz)	organisatorisch	Der Einsatz von Edge-Computing ermöglicht die Reduktion von Abhängigkeiten und die Gewährleistung einer kontinuierlichen Handlungsfähigkeit der Anwenderunternehmen.
Ermöglichung der Zusammenarbeit mit Partnern unter Wahrung der Datensouveränität	organisatorisch	Der Einsatz von Edge-Computing in Anwendungsvorhaben ermöglicht durch die lokale Verarbeitung der Daten die datenbasierte Zusammenarbeit der Akteure unter Wahrung ihrer Datensouveränität.
Optimierung von Prozessabläufen (z.B. Qualitätsmanagement)	organisatorisch	Der Einsatz von Edge-Computing im Anwendungsvorhaben ermöglicht die Verbesserung existierender Prozessabläufe im Anwenderunternehmen.
Steigerung der Zufriedenheit der Nutzenden	organisatorisch	Mithilfe des Einsatzes von Edge-Computing wird eine höhere Zufriedenheit der Nutzenden erreicht, etwa, indem die Datenverarbeitungszeit signifikant reduziert wird oder zusätzliche Leistungen ermöglicht werden.
Frühzeitige Berücksichtigung aktueller Gesetzgebungsaktivitäten auf europäischer Ebene (z.B. Data Governance Act)	rechtlich	Edge-Computing verbessert beziehungsweise vereinfacht die Konformität des Anwendungsvorhabens mit den aktuellen Gesetzgebungsaktivitäten in der Datenwirtschaft auf europäischer Ebene.
Vereinfachte Einhaltung von spezifischen zu erfüllenden Datenschutz- und Datensicherheitsanforderungen (z.B. KRITIS)	rechtlich	Der Einsatz von Edge-Computing ermöglicht die vereinfachte Einhaltung branchenspezifischer Datenschutz- und Datensicherheitsanforderungen, beispielsweise für kritische Infrastrukturen.
Ermöglichung von DSGVO-konformer Verarbeitung personenbezogener Daten	rechtlich	Der Einsatz von Edge-Computing ermöglicht eine lokale (Vor-)Verarbeitung von Daten. So wird sichergestellt, dass personenbezogene Daten nicht weitergegeben werden.
Ermöglichung von effizienten standort- bzw. gerätebezogenen Diensten (Location Awareness / Kontextsensitivität)	technisch	Edge-Computing-Anwendungsfälle können eine Anpassung von Diensten anhand des Standorts oder des verbundenen Geräts vornehmen. Beispielsweise können Aufgaben von mobilen Edge-Computing-Devices bei entsprechender Verbindung auf leistungsstärkere, ortsfeste Geräte ausgelagert werden.
Verbesserung der Resilienz der Dateninfrastruktur	technisch	Der Einsatz von Edge-Computing im Anwendungsvorhaben ermöglicht die Schaffung einer resilienterer Dateninfrastruktur durch die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit bei Ausfall einzelner Systemkomponenten.

Potenzial	Typ	Beschreibung
Ermöglichung von Datenverarbeitung mit geringen Latenzzeiten bzw. Echtzeitfähigkeit	technisch	Edge-Computing ermöglicht im Anwendungsfall geringe Latenzzeiten, da viele der eingesetzten Systeme eine geringe räumliche Distanz zueinander haben, die ihrerseits mit einer geringeren Zeit für die Datenübertragung einhergeht.
Ermöglichung von Datenverarbeitung bei geringer Netzabdeckung	technisch	Durch die lokale Verarbeitung der Daten mittels Edge-Computing wird das Wertversprechen auch an Orten mit schlechter Netzabdeckung garantiert.
Zuverlässige Verarbeitung großer Datenmengen	technisch	Im Anwendungsfall ermöglicht Edge-Computing die Verarbeitung großer Datenmengen durch lokal ausgeführte Algorithmen. Dadurch reduziert sich die Datenmenge, die an Rechenzentren übertragen werden muss und durch schlechte Netzwerkverbindung beeinträchtigt werden kann.
Kosteneinsparung durch effizientere Nutzung von Ressourcen (z.B. Bandbreite, Daten, Personal)	wirtschaftlich	Verschiedene Ressourcen können durch den Einsatz von Edge-Computing-Anwendungsfällen verringert werden. Beispielsweise wird eine Reduktion von Personal durch Remoteüberprüfung möglich. Zudem wird durch lokale Datenverarbeitung Bandbreite eingespart.
Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsbilanz (z.B. Energieverbrauch, CO2-Fußabdruck)	wirtschaftlich	Im Vergleich zu Cloud-Computing benötigt Edge-Computing in bestimmten Szenarien aufgrund der reduzierten Datenmenge, die zwischen den einzelnen Komponenten des Netzes bewegt wird, weniger Energie. Weiterhin kann Edge-Computing selbst Anwendungsvorhaben zur Energiereduktion in anderen Bereichen befähigen.
Entwicklung und Vermarktung neuartiger Produkte und Services	wirtschaftlich	Die Nutzung von Edge-Computing ermöglicht einen Schneeballeffekt, sodass darauf aufbauend neuartige Produkte und Services etabliert werden können.
Vorantreiben der digitalen Transformation	wirtschaftlich	Mit dem Edge-Computing-Anwendungsvorhaben wird der Digitalisierungsgrad des Unternehmens erhöht und durch das Einbinden weiterer Technologien ein „Trickle-Down-Effekt“ erzeugt, indem das Projekt als Vorreiter für die Implementierung verschiedener Technologien dient.

Tabelle 2: Erläuterung der Potenziale

Herausforderung	Typ	Beschreibung
Befürchtung eines Vendor-lock-ins	organisatorisch	Die Gefahr eines Vendor-lock-ins besteht, wenn es den Akteuren innerhalb eines Anwendungsvorhabens nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist, die eingesetzte Lösung zu wechseln.
Unzureichende Verfügbarkeit von Fachkräften und Knowhow	organisatorisch	Edge-Computing ist derzeit eine neue und junge Technologie, sodass nur wenige Personen Erfahrungen haben, Edge-Computing-Systeme zu gestalten und umzusetzen.

Herausforderung	Typ	Beschreibung
Vorbehalte hinsichtlich der Integrationsfähigkeit in bestehende Prozesse und Abläufe	organisatorisch	Befürchtung, das Edge-Computing-Anwendungsvorhaben nur mit hohem Aufwand in bereits vorhandene Unternehmensprozesse integrieren zu können.
Vorbehalte hinsichtlich der Wahrung von Geschäftsgeheimnissen	organisatorisch	Befürchtung, dass durch die Anwendung des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens mögliche Geschäftsgeheimnisse offengelegt werden.
Vorbehalte hinsichtlich der Wahrung der Datensouveränität	organisatorisch	Befürchtung des Datengebers, durch die Nutzung von Daten innerhalb des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens die volle Kontrolle über die Daten zu verlieren.
Sicherung des „Freedom-to-Operate“	rechtlich	Sicherstellung, dass durch das Edge-Computing-Anwendungsvorhaben keine existierenden Schutzrechte verletzt werden.
Umgang mit Marktregulierungsfragen	rechtlich	Sicherstellung, dass durch das Edge-Computing-Anwendungsvorhaben keine Marktregularien verletzt werden.
Umgang mit Haftungsfragen	rechtlich	Gestaltung von Regelungen zur Haftung bei Schäden während der Realisierung oder des Einsatzes der Edge-Computing-Anwendung.
Gestaltung von Verträgen (z.B. zur Datenüberlassung oder Datennutzung)	rechtlich	Gestaltung von rechtskonformen Verträgen zur Überlassung bzw. Nutzung von Daten des Datengebers im Edge-Computing-Anwendungsvorhaben.
Konformität mit aktuellen Gesetzgebungsaktivitäten auf europäischer Ebene (u.a. Data Governance Act)	rechtlich	Sicherstellung der Konformität des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens mit den aktuell in Arbeit befindlichen Gesetzgebungsaktivitäten in der Datenwirtschaft auf europäischer Ebene.
Konformität mit bestehender Gesetzgebung (z.B. DSGVO, KRITIS)	rechtlich	Sicherstellung der Konformität des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens mit bereits bestehender Gesetzgebung im Bereich der Datenwirtschaft.
Langfristige Sicherstellung der Gerätesicherheit	technisch	Langfristige Sicherstellung der Sicherheit der eingesetzten Geräte, die sich üblicherweise physisch außerhalb der Reichweite des Anbieters befinden.
Langfristige Sicherstellung der Datensicherheit	technisch	Langfristige Sicherstellung der Datensicherheit, beispielsweise durch Reaktion auf neue Angriffsmöglichkeiten durch Softwareupdates.
Geringer Reifegrad technischer Instrumente bzw. Komponenten zur Realisierung von Datensouveränität (z.B. Gaia-X, IDSA)	technisch	Der derzeit geringe Reifegrad von technologischen Komponenten der Datensouveränität erschwert die technische Realisierung von Datensouveränität innerhalb des Edge-Computing-Anwendungsvorhabens.

Herausforderung	Typ	Beschreibung
Fehlende Standards zur Sicherstellung der Portabilität und Interoperabilität von Daten bzw. Komponenten	technisch	Das Fehlen von Standards zur Sicherstellung der Portabilität und Interoperabilität von Daten und Komponenten führt zu Herausforderungen beim reibungslosen Austausch von Daten zwischen verschiedenen Systemen bzw. dem Austausch von einzelnen Systemkomponenten.
Sicherstellung eines effizienten Managements bzw. Orchestrierung von Edge-Computing-Geräten	technisch	Als föderiertes System ergeben sich neue Herausforderungen in den Bereichen Management und Orchestrierung wie beispielsweise der Verteilung von Prozessen auf Ressourcen oder bei Systemupdates
Aufwändige Anbindung an bestehende Datenmanagementinfrastruktur	technisch	Die Anbindung des Edge-Anwendungsvorhabens an eine bestehende Datenmanagementinfrastruktur in Unternehmen ist zeit- und ressourcenintensiv, da oftmals Brückentechnologien entwickelt werden müssen, um eine Anbindung an existierende Systeme zu gewährleisten.
Unsicherheiten im Hinblick auf zukünftig anfallende Betriebsausgaben	wirtschaftlich	Vorbehalte der Anwender basierend auf den Unsicherheiten der laufenden Kosten eines Edge-Computing-Systems, da nicht abgeschätzt werden kann, wie teuer die Wartung und Softwareupdates sein werden.
Vorbehalte hinsichtlich der Rentabilität der Investition („Return-on-Invest“)	wirtschaftlich	Durch Investitions- und laufende Kosten befürchten die Anwender eine wirtschaftlich unrentable Lösung.
Vorbehalte aufgrund der zu erwartenden Investitionskosten	wirtschaftlich	Der Einsatz eines Edge-Computing-Systems benötigt initial hohe Investitionen zur Beschaffung der benötigten Komponenten, wie Sensoren und Rechenzentren. Dies steht im Gegensatz zum „pay-as-you-go“-Ansatz der Cloud-Computing-Provider. Entsprechend könnten gewisse Akteure abgeschreckt werden.
Vorbehalte hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses	wirtschaftlich	Durch die hohen Kosten bei der Umsetzung von Edge-Computing-Systemen, besitzen die Anwender Vorbehalte hinsichtlich der Realisierung eines positiven Kosten-Nutzen-Verhältnisses (außerhalb allein wirtschaftlicher Faktoren).

Tabelle 3: Erläuterung der Herausforderungen