

Architektur zur technischen Umsetzung von Wald und Holz 4.0

Ein KWH4.0-Standpunkt

14.12.2020

Kompetenzzentrum Wald und Holz 4.0
c/o RIF Institut für Forschung und Transfer e.V. (Projektkoordination)
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20
D-44227 Dortmund
www.kwh40.de

Kontakt

Kompetenzzentrum Wald und Holz 4.0
 c/o RIF Institut für Forschung und Transfer e.V. (Projektkoordination)
 Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20
 D-44227 Dortmund
 www.kwh40.de

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Frank Heinze
 Tel. +49 (0) 231 9700-781
frank.heinze@rt.rif-ev.de

Verantwortliche Autoren: Marlene Gebhard, M. Sc. und Dr. Michael Schluse, MMI

Autoren



RIF Institut für Forschung und Transfer e.V. (Koordinator)
 Geschäftsführer: Dipl.-Inf. Michael Saal
 Joseph-von-Fraunhofer Str. 20, 44227 Dortmund



Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen
 Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
 Steinbachstraße 19, 52074 Aachen



Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), RWTH Aachen
 Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann
 Ahornstraße 55, 52074 Aachen



Institut für Arbeitswissenschaft (IAW), RWTH Aachen
 Institutsleiterin: Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch
 Bergdriesch 27, 52062 Aachen

Landesbetrieb Wald und Holz
 Nordrhein-Westfalen



Wald und Holz NRW, Lehr- und Versuchsforstamt Arnsberger Wald
 Forstliches Bildungszentrum für Waldarbeit und Forsttechnik
 Leitung: FD Thilo Wagner
 Alter Holzweg 93, 59755 Arnsberg

Förderhinweis

Dieses Vorhaben wird gefördert durch das Land Nordrhein-Westfalen unter Einsatz von Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).



EFRE.NRW
 Investitionen in Wachstum
 und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
 Investition in unsere Zukunft
 Europäischer Fonds
 für regionale Entwicklung

Version	Datum	Seiten	Änderungen
1.0	14.12.2020	Alle	Erste offizielle Version

Architektur zur technischen Umsetzung von Wald und Holz 4.0

Basierend auf dem *Referenzarchitekturmodell Wald und Holz 4.0*¹ wird im vorliegenden Standpunkt eine **konkrete Architektur** zur technischen Umsetzung von Wald und Holz 4.0 vorgestellt. Der Standpunkt gibt einen Überblick über die technische Umsetzung und damit der Vernetzung und Orchestrierung in Wald und Holz 4.0. Hierzu werden Strukturen definiert, mit denen die Ebenen der Digitalen Zwillinge, Dienste und Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie die Übergänge Sensor-/Aktornetzwerke, DZ-Plattformen und Informationsbroker umgesetzt werden (vgl. Abbildung 1-1), sodass die Anforderungen der unterschiedlichen Elemente und der hieraus konfigurierten Anwendungen erfüllt werden. Ein Schwerpunkt liegt auf der Abwägung zwischen Cloud-, Fog- und Edge-basierter Umsetzung des Konzepts.

¹ Siehe KWH4.0-Standpunkt „Referenzarchitektur für Wald und Holz 4.0“ unter <https://www.kwh40.de/veroeffentlichungen/>

1 Übergreifende Architektur der technischen Umsetzung

Die Vernetzung und Orchestrierung in Wald und Holz 4.0 (WH4.0) ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Die Infrastruktur besteht aus einzelnen Schichten, die miteinander interagieren. Die unterste Schicht stellt die physischen Assets dar. Die Assets sind über Sensoren und Aktoren über interne Schnittstellen mit ihren jeweiligen Digitalen Zwillingen (DZ) auf der zweiten Ebene verbunden und bilden sogenannte WH4.0-Komponenten. Die Digitalen Zwillinge werden in DZ-Plattformen verwaltet und interagieren auf der nächsten Ebene mit WH4.0-Diensten (Software-Diensten). Der Informationsbroker macht DZ und WH4.0-Dienste auffindbar. Sowohl DZ als auch WH4.0-Dienste kommunizieren wiederum mit WH4.0-Mensch-Maschine-Systemen² (MMS), die geeignete Methoden zur Interaktion von DZ und WH4.0-Diensten mit den Anwendern entsprechend der Anforderungen verschiedener Einsatzgebiete bereitstellen. WH4.0-Komponenten, -Dienste und -MMS bilden zusammen die WH4.0-Dinge (in Anlehnung an das Internet der Dinge).

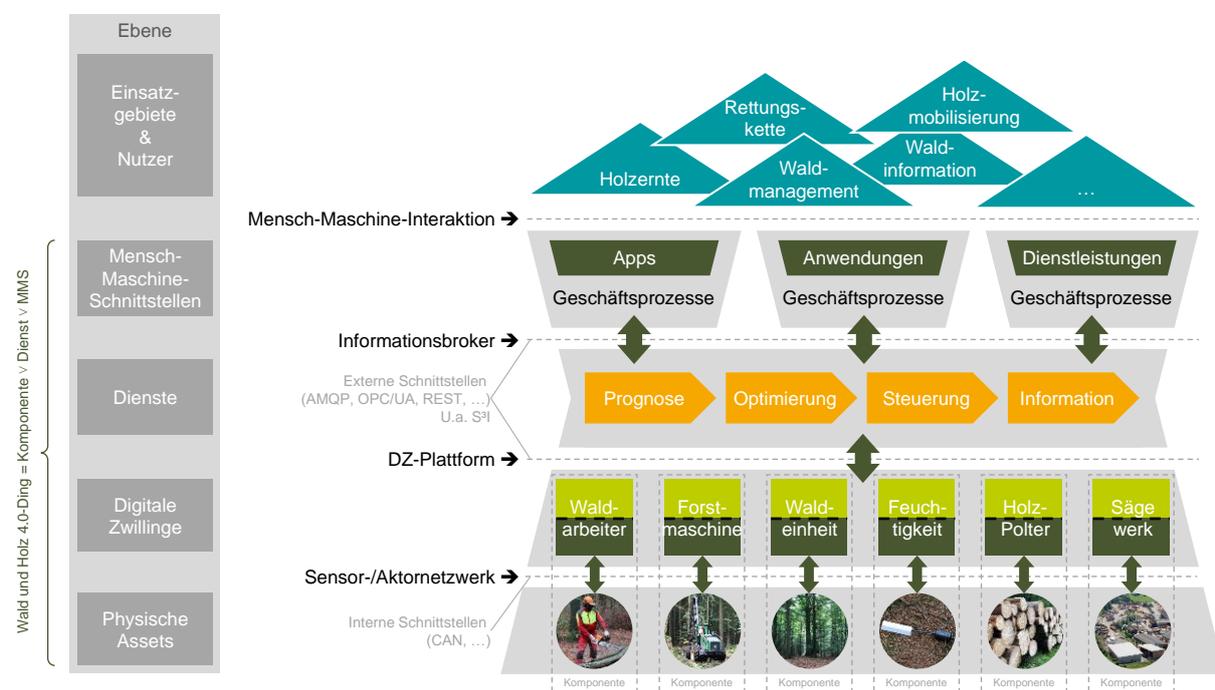


Abbildung 1-1: Vernetzung und Orchestrierung in Wald und Holz 4.0^{3,4}

Die Assets und die Nutzer, also die unterste und oberste Schicht, befinden sich an einem konkreten Ort (der sich im Prozessverlauf natürlich ändern kann). Die Ebenen dazwischen beziehen sich auf Vernetzung und Datenaustausch sowie Softwaredienste und Datenauswertung. Während am unteren Rand der Architektur mit realen Ein- und Ausgangsgrößen der physischen Assets und der hiermit verbundenen physischen Prozesse gearbeitet wird, werden oberhalb typischerweise aus den Daten abgeleitete virtuelle Prozessgrößen, also Informationen, verwendet. Die Umsetzung dieser Ebenen ist – geeignete Kommunikationsinfrastrukturen vorausgesetzt – zudem nicht örtlich gebunden und kann frei innerhalb der Kommunikationsinfrastrukturen umgesetzt werden.

² „Ein Mensch-Maschine-System ist durch das Zusammenwirken eines oder mehrerer Menschen mit einem technischen System gekennzeichnet. Es ist dabei üblich, mit dem Begriff Maschine allgemein technische Systeme aller Art zu bezeichnen.“ Quelle: G. Johannsen, „Einführung“ in *Mensch-Maschine-Systeme*, G. Johannsen, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993, S. 1–17.

³ Grundlage dieser Struktur ist das „Referenzmodell für das Internet der Dinge und Dienste“ aus den „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0“ der acatech, 2013

⁴ Fotos (v. l.): A. Böhm, RIF; F. Heinze, RIF; S. Wein, WZL; A. Böhm; S. Wein; Michael Lorenzet / [pixelio](http://pixelio.com)

Während am unteren Rand der Kommunikationsinfrastrukturen oft hardwarenahe Protokolle wie CAN⁵ eingesetzt werden, werden die darüber liegenden Ebenen typischerweise mit einer IP⁶-basierten IT-Infrastruktur umgesetzt. Dabei haben die DZ, Dienste und MMS unterschiedliche Anforderungen an die IT-Infrastruktur, um die Bedürfnisse ihrer Assets und der Anwendungen erfüllen zu können. Der DZ eines Waldarbeiters möchte die Vitaldaten des Waldarbeiters in Echtzeit auswerten und im Notfall mit minimaler Latenzzeit an eine Rettungseinrichtung schicken. DZ von Umweltsensoren benötigen demgegenüber keine Kommunikation in Echtzeit, dafür aber ggfls. eine größere Kommunikationsbandbreite und einen Datenspeicher, in den sie große Mengen an Sensorwerten ablegen können.

Abbildung 1-2 skizziert die technische Umsetzung der Kommunikation der Schichten oberhalb der physischen Assets über die **Smart Systems Service Infrastructure (S³I)**⁷. Die S³I stellt damit eine mögliche Verknüpfung der oben gezeigten Schichten zu übergreifenden Wertschöpfungsnetzwerken dar. Die DZ auf der untersten Ebene dieser Wertschöpfungsnetzwerke sind im Idealfall „situation aware“ und eigeninitiativ und nutzen S³I, um mit anderen WH4.0-Dingen zu kommunizieren. Konkrete Anwendungen entstehen damit situationspezifisch durch geeignete Zusammenstellung von WH4.0-Dingen.

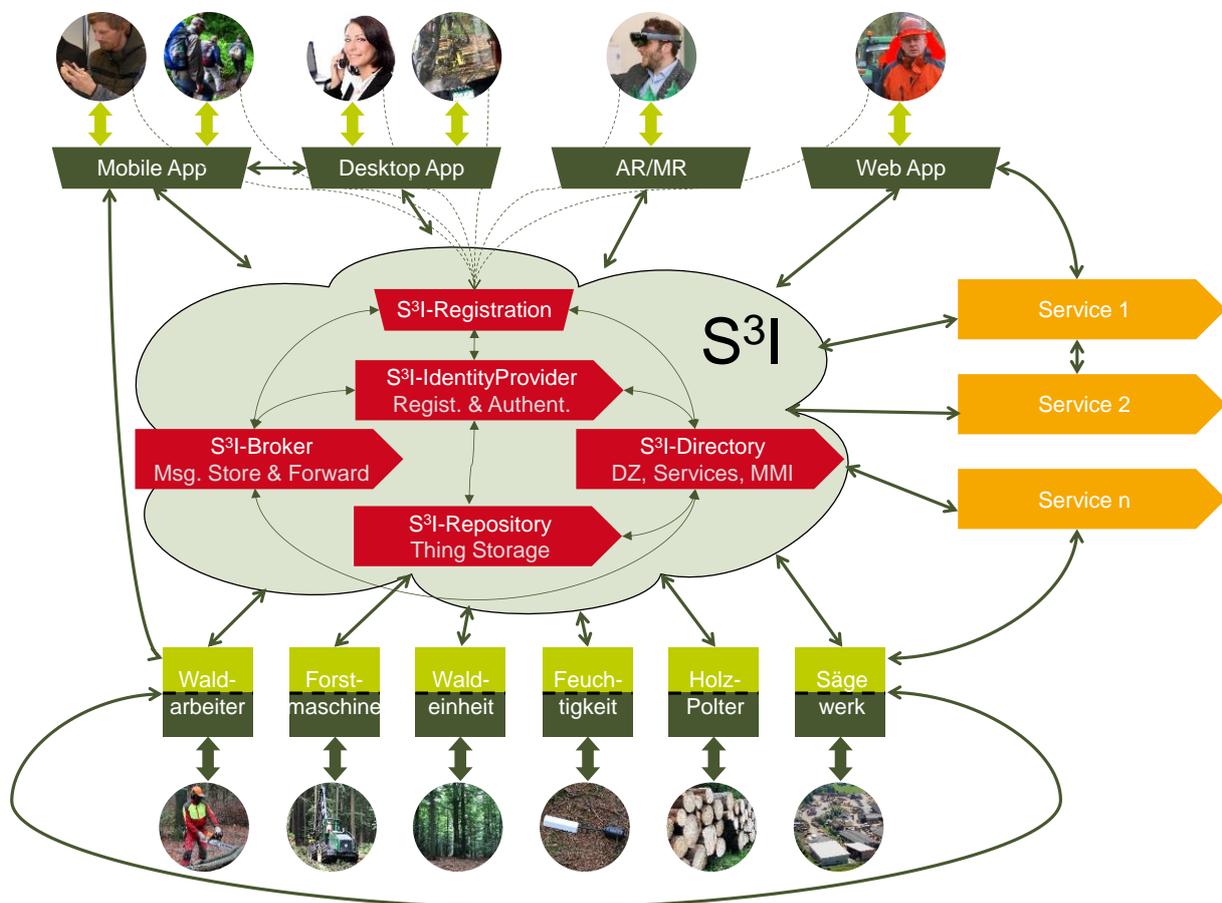


Abbildung 1-2: Grundkonzept der Smart Systems Service Infrastructure⁸

⁵ Controller Area Network

⁶ Internet Protocol

⁷ Siehe KWH4.0-Standpunkt „Smart Systems Service Infrastructure (S³I)“ unter <https://www.kwh40.de/veroeffentlichungen/>

⁸ Fotos: (o.) A. Böhm, RIF; Rainer Sturm / [pixelio](https://www.pixelio.com/); Konstantin Gastmann / [pixelio](https://www.pixelio.com/); Stefan Wein, WZL; A. Böhm; Peter Kamp / [pixelio](https://www.pixelio.com/); (u.) A. Böhm; F. Heinze, RIF; S. Wein; A. Böhm; S. Wein; Michael Lorenzet / [pixelio](https://www.pixelio.com/)

2 Plattformen

Plattformen stellen eine technische Realisierung zur Verwaltung von Daten und Diensten zur Verfügung⁹. Eine Plattform bietet einen Raum – materiell oder virtuell – in dem sich Beteiligte (in Bezug auf die eingangs gezeigte Architektur; DZ, Dienste, MMS und Personen) treffen, um einen Mehrwert zu generieren¹⁰. Der Raum muss dabei nicht zusammenhängend sein, sondern kann als verteilte Plattform mit einer Vielzahl an Zielrechnern realisiert sein¹¹.

Plattformen haben branchenspezifische Ausprägungen. Im Bereich des „Digital Business“ geht es beispielsweise darum, Käufer und Verkäufer zusammen zu bringen und Services wie Kaufabwicklung und Versand zur Verfügung zu stellen. Im industriellen Bereich definiert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie¹² eine I(Industrie)4.0-Plattform als „Implementierung einer [...] Kommunikations- und Systeminfrastruktur“. Diese Infrastruktur bietet „Management- und Produktivdienste [...] als Basis für den effizienten Aufbau und die Integration von I4.0-Systemen¹³ in einer Anwendungsdomäne“. Durch Nutzung einer I4.0-Plattform kann sich der Anwender daher auf die Funktionalität seines Produktes konzentrieren, während die Plattform die Integration des Produkts in das Internet der Dinge, Dienste und Personen (engl. „Internet of Things, Services and People, IoTSP“) übernimmt.

Der Begriff der „IoT-Plattform“ weicht von dem der I4.0-Plattform laut Deloitte nicht weit ab. Die IoT-Plattform ist als Middleware zwischen den Endgeräten und den Geschäftsanwendungen zu sehen. Die Kernaufgabe der Plattform ist, zwischen diesen beiden Enden zu vermitteln. Moderne IoT-Plattformen ergänzen weitere Funktionalität wie Möglichkeiten für die Datenverarbeitung auf dem Endgerät oder komplexe Datenanalysealgorithmen in der Applikationsschicht. Das übergeordnete Ziel ist dabei immer, Interoperabilität¹⁴ zwischen Infrastruktur und Geschäftsanwendungen zu schaffen, sodass IoT-Lösungen schneller, kostengünstiger und besser werden¹⁵. Eine Herausforderung hierbei ist die Einbindung vieler Endgeräte, deren Datenströme simultan koordiniert werden müssen. Nach Alonso¹⁶ ist das massive Sammeln von Daten physischer Assets sogar eines der wichtigsten Eigenschaften von IoT-Plattformen. Damit die Informationsflüsse erfolgreich zusammengeführt werden können, müssen die passenden Technologien für die einzelnen Komponenten gefunden werden. Im Allgemeinen stehen Technologien mit unterschiedlichen Ansätzen zur Datenspeicherung, Kommunikationsinfrastruktur und Zugriffsregelung zur Verfügung.

⁹ H. Cai et al., „IoT-Based Configurable Information Service Platform for Product Lifecycle Management“, IEEE Transactions on industrial informatics, Jg. 10, Nr. 2, S. 1558–1567, 2014.

R. Lea und M. Blackstock, Hg., City hub: A cloud-based IoT platform for smart cities. IEEE: IEEE, 2014.

D. Vasisht et al., Hg., Farmbeats: An IoT platform for data-driven agriculture, 2017.

¹⁰ A. Hagi und J. Wright, „Multi-sided platforms“, International Journal of Industrial Organization, Jg. 43, S. 162–174, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167718715000363>, 2015.

¹¹ Gartner, Platform (Digital Business). [Online] Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/it-glossary/platform-digital-business>.

¹² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Bildung und Forschung, Plattform Industrie 4.0: Glossar. [Online] Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar_Formular.html?resourceId=1022602&input_ =1020846&pageLocale=de&titlePrefix=#form-1022602.

¹³ System aus I4.0-Komponenten und Komponenten geringerer CP-Klassifizierung, das einem bestimmten Zweck dient, definierte Eigenschaften aufweist und standardisierte Dienste und Zustände unterstützt (Plattform Industrie 4.0, Glossar, [Online] Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar_Formular.html?resourceId=1022602&input_ =1020842&pageLocale=de&titlePrefix=#form-1022602)

¹⁴ Interoperabilität bezeichnet die Fähigkeit von Systemen, Einheiten oder Organisationen, Dienste zur Verfügung zu stellen und Dienste anderer Systeme, Einheiten oder Organisationen zu nutzen. (Fraunhofer IOSB, visIT – Interoperabilität, Jg. 14, 2013.)

¹⁵ Leonard Michalas, IoT Platforms: Enable your enterprise to build IoT solutions faster, cheaper and better. [Online] Verfügbar unter: <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology/articles/iot-platforms.html>.

¹⁶ R. S. Alonso, I. Sittón-Candanedo, S. Rodríguez-González, Ó. García und J. Prieto, „A Survey on Software-Defined Networks and Edge Computing over IoT“ in *Highlights of Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems*, S. 289–301.

2.1 Cloud-Computing

Cloud-Computing¹⁷ ist nach NIST¹⁸ ein Modell für den allgegenwärtigen, komfortablen On-Demand-Netzwerkzugriff auf einen gemeinsamen Pool von konfigurierbaren Ressourcen (z.B. Netzwerke, Server, Speicher und Anwendungen). Die Ressourcen können mit minimalem Verwaltungsaufwand oder Interaktion mit Dienst Anbietern schnell bereitgestellt und freigegeben werden. Die Motivationen für die Nutzung von Cloud-Computing-Infrastrukturen sind im Allgemeinen die flexible Nutzung von Computerressourcen und der Austausch von Daten unter einer Vielzahl von Nutzern.

Cloud-Computing zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Unternehmen erhalten **kostengünstig Zugriff auf moderne Informationstechnik**¹⁹. Im Allgemeinen werden Cloud-Dienste hierbei nach genutzter Leistung bezahlt und werden auf die entsprechenden Bedürfnisse skaliert. Die Abrechnung erfolgt über die Anzahl der Aufrufe, Datenmengen oder (z.B. sekundengenaue) Zeiteinheiten. Kostengünstig ist Cloud-Computing dann, wenn es sich für das Unternehmen nicht lohnt, eigene IT-Infrastrukturen aufzusetzen, weil keine konstante Auslastung durch eigene Verbraucher gegeben ist. Cloud-Computing ist im Allgemeinen zuverlässiger als Infrastrukturen, die innerhalb von Unternehmen aufgebaut werden²⁰.
- Neben dem Zugriff auf skalierbare und kostengünstige IT-Ressourcen bietet die Cloud als zweite Eigenschaft den **Zugriff vieler verteilter Nutzer auf gemeinsame Ressourcen**. Damit werden zentrale Plattformen geschaffen, auf der Daten und Dienste zusammengeführt werden und eine Auswertung und Vernetzung möglich wird. Ein Beispiel hier ist Adamos²¹, eine Cloud-Plattform, bei der sich mittelständige Maschinen- und Anlagenbauer zusammengeschlossen haben und gemeinsam einen hersteller- und IoT-Plattform-übergreifenden Zugriff auf Applikationen und Daten nutzen.
- **Für die Datensicherheit sind Experten zuständig**, die Sicherheitskonzepte nach dem neusten Stand der Technik entwickeln. Die Authentifizierungs- und Autorisierungsmethoden der Cloud-Anbieter sind daher ausgereift und erlauben ein hohes Maß an Sicherheit, sodass sich die nutzenden Unternehmen darauf verlassen können²².

In Abbildung 2-1 sind WH4.0-Dinge in einer bzw. um eine Cloud angeordnet. In der Cloud „lebt“ beispielsweise der Digitale Zwilling eines Feuchtigkeitsensors, der über die Schnittstellen der Cloud mit dem realen Feuchtigkeitsensor verbunden ist. Web-Apps sind ebenfalls in der Cloud realisiert, während mobile Apps auf Geräten außerhalb der Cloud laufen. Dienste und DZ sind dabei nicht auf die Cloud beschränkt, sondern sind je nach Anwendung auf den Assets selbst oder in der Cloud realisiert. Die Kommunikation, wie hier beispielsweise zwischen zwei DZ, muss uneingeschränkt über die Schnittstellen der Cloud möglich sein. Clouds unterstützen dazu aktuelle Kommunikationsprotokolle.

¹⁷ Siehe KWH4.0-Standpunkt „Grundlagentechnologien für Wald und Holz 4.0“ unter <https://www.kwh40.de/veroeffentlichungen/>

¹⁸ P. Mell und T. Grance, *The NIST Definition of Cloud Computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*.

¹⁹ Symantec.cloud, Weathering the Storm - Considerations for Organizations Wanting to Move to the Cloud. [Online]. Verfügbar unter: http://www.mcrinc.com/Documents/Newsletters/201111_WeatheringtheStorm.pdf.

²⁰ Y. Jadeja und K. Modi, „Cloud computing-concepts, architecture and challenges“ in 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), 2012, 877--880.

²¹ <https://www.adamos.com/>

²² S. Milad Dejamfar und S. Najafzadeh, „Authentication Techniques in Cloud Computing: A Review“, IJARCSSE, Jg. 7, Nr. 1, S. 95–99, 2017, doi: 10.23956/ijarcsse/V711/01105.

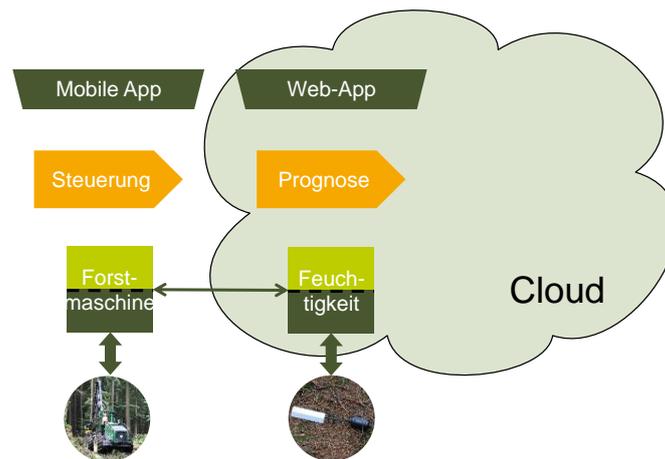


Abbildung 2-1: WH4.0-Dinge innerhalb und außerhalb der Cloud.

2.2 IoT-Plattformen

Das Unternehmen IoT Analytics²³ vergleicht in seinem „IoT Platforms Market Report 2018-2023“ IoT-Plattformen von 450 Anbietern. Anbieter und Angebote sind dabei untereinander meist nicht vergleichbar. Bei der einfachsten Form einer IoT-Plattform geht es nur darum, die Verbindung zwischen Dingen oder Geräten zu ermöglichen. Größere Plattformen hingegen bieten eine Vielzahl an Diensten wie Datenspeicher, Algorithmen für weiterführende Berechnungen oder externe Schnittstellen für Drittanbieter-Systeme²⁴. Gemessen am Marktanteil sind die *Amazon Web Services* mit ca. 33 % führend. *Microsoft Azure* folgt mit ca. 15 %, *Google Cloud Platform* und *IBM Cloud* sind etwa gleichauf mit 8 %. Die verbleibenden 48 % sind auf viele kleinere Anbieter verteilt²⁵.

2.3 DZ-Plattformen

Gegenstimmen zu Cloud-Computing werden gerade in den letzten Jahren immer deutlicher. Deloitte beschreibt in einer Studie, dass es sich bei den IoT-Plattformen um geschlossene Plattformen und isolierte Datensilos handelt, denen Interoperabilität fehlt. Diese Probleme entstehen durch das *Vendor Lock-In*, bei dem die Nutzer abhängig von einem bestimmten Anbieter sind und nicht ohne erhebliche Kosten, rechtliche Zwänge oder technische Unvereinbarkeiten die Dienste eines anderen Anbieters nutzen können²⁶. Eine übergreifende Kommunikation sei somit unmöglich. Zum Lösen des Problems bedarf es nach Deloitte zweier Elemente: Ein übergreifendes Datenmanagement-Layer und Datencontainer.

Bezüglich des Datenmanagement-Layers schlägt Deloitte eine „Supra-Plattform“ vor, die Insellösungen miteinander verbindet. Ansätze einer solchen Supra-Plattform bietet das quelloffene Eclipse Vorto²⁷. Vorto implementiert einen gemeinsamen Rahmen für Informationsmodelle²⁸, die die Integration von Dingen in IoT-Plattformen erleichtern und Interoperabilität zwischen den Plattformen fördern soll. Ein weiteres Projekt in diesem Bereich ist INTER-IOT²⁹, dessen übergeordnetes Ziel ein interoperables und

²³ IoT Analytics GmbH, IoT Platform Comparison: How the 450 providers stack up. [Online]. Verfügbar unter: <https://iot-analytics.com/iot-platform-comparison-how-providers-stack-up/>. Zugriff am: 7. August 2019.

²⁴ IoT Analytics GmbH, 5 Things To Know About The IoT Platform Ecosystem. [Online]. Verfügbar unter: <https://iot-analytics.com/5-things-know-about-iot-platform/>. Zugriff am: 7. August 2019.

²⁵ IEEE Communication Society - Technology Blog, Synergy Research: Cloud Service Provider Rankings. [Online]. Verfügbar unter: <https://tech-blog.comsoc.org/2019/02/05/synergy-research-cloud-service-provider-rankings/>. Zugriff am: 7. August 2019.

²⁶ J. Opara-Martins, R. Sahandi und F. Tian, „Critical analysis of vendor lock-in and its impact on cloud computing migration: a business perspective“, *Journal of Cloud Computing*, Jg. 5, Nr. 1, S. 4, 2016, doi: 10.1186/s13677-016-0054-z.

²⁷ <https://www.eclipse.org/vorto/>

²⁸ O. Weinmann, *How Eclipse Vorto is helping the IoT to evolve - Bosch ConnectedWorld Blog*. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.bosch-si.com/developer/eclipse-vorto-helping-iot-evolve/>. Zugriff am: 7. August 2019.

²⁹ <https://inter-iot.eu/>

offenes IoT-Framework mit den dazugehörigen Engineering-Tools und -Methoden ist. Mit einem schichtenorientierten Ansatz wird eine nahtlose Integration heterogener IoT-Plattformen unabhängig von den Anwendungsbereichen ermöglicht.³⁰

Ansätze für übergreifende Datenmanagement-Layer sind also vorhanden, offen ist die Frage nach den Datencontainern, die Interoperabilität von IoT-Plattformen laut Deloitte ermöglichen sollen. Hierzu sollen die Datencontainer die Schnittstelle zwischen realer und digitaler Welt bilden und die Daten in einer konsistenten und logischen Struktur speichern. Bei der Umsetzung dieser Lösung helfen Digitale Zwillinge. Sie akquirieren Daten ihres realen Gegenstücks und bringen sie in eine logische Struktur, sodass Dritte diese sinnvoll abfragen und verarbeiten können. So legt der Digitale Zwilling den Grundstein für eine Supra-Plattform, indem er die Daten zusammenführt und normiert, sodass Daten aus unterschiedlichen Domänen ausgetauscht werden können.

Nicht nur Interoperabilität, sondern auch Struktur und Semantik sind Argumente, Digitale Zwillinge in IoT-Plattformen zu integrieren. Die Anbieter solcher Digitalen Zwillinge-Plattformen fokussieren dabei unterschiedliche Aspekte wie das Verwalten realer Assets während des Betriebs oder den Entwicklungsprozess des Digitalen Zwillinges. DZ-Plattformen gehören meist zu den „Device Management Platforms“ und „Connectivity Backend Platforms“³¹ und betrachten dann das reale Asset während der Lebenszeit zur Datenanalyse, Anwendung oder Systemintegration. Beispiele für DZ-Plattformen sind die SAP Leonardo Plattform³², die Bosch IoT Things Plattform³³ oder die Azure Digital Twins³⁴.

³⁰ C. Savaglio, G. Fortino, R. Gravina und W. Russo, Hg., A methodology for integrating internet of things platforms. IEEE: IEEE, 2018.

³¹ B. Copigneaux(IDATE), T. Ramahandry (IDATE), S. Ropert (IDATE), N.Vlasov (IDATE), D. Pap (ATOS), D. Esteban(ATOS), M.Álvarez(GRAD), R. Muleiro (GRAD), O. Vermesan, *Business and sustainability models for large-scale IoT scenarios*. [Online]. Verfügbar unter: https://european-iot-pilots.eu/wp-content/uploads/2020/06/DO2_05_WP2_H2020_CREATE-IoT_Final.pdf.

³² SAP, SAP Intelligent Asset Management. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sap.com/about/announcement/intelligent-asset-management.html>. Zugriff am: 7. August 2019.

³³ Bosch Software Innovations GmbH, Bosch IoT Things: Managed inventory of digital twins: Bosch IoT Suite. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-iot-suite.com/service/things/#learnmore>. Zugriff am: 7. August 2019.

³⁴ B. van Hoof, Announcing Azure Digital Twins: Create digital replicas of spaces and infrastructure using cloud, AI and IoT. [Online]. Verfügbar unter: <https://blogs.microsoft.com/iot/2018/09/24/announcing-azure-digital-twins-create-digital-replicas-of-spaces-and-infrastructure-using-cloud-ai-and-iot/>. Zugriff am: 7. August 2019.

3 Edge-Computing

Cloud-Computing führt immer zu zentralisierten Architekturkonzepten. Das Hauptproblem daran ist, dass alle Nutzer ihre Daten zu diesem zentralen Knoten schicken und von diesem Knoten abfragen müssen. Voraussetzung dafür ist je nach Anzahl der Nutzer ein starkes Kommunikationsnetz, was diesen Datentransfer leisten kann. Der Datentransfer setzt nicht nur die passende Infrastruktur voraus, sondern kostet zusätzlich Energie und Zeit. Für latenzkritische Anwendungen auf mobilen Geräten bieten sich diese zentralen Strukturen beispielsweise nicht an.

Die zentralen Strukturen werden beim Edge-Computing aufgelöst. Teile des Cloud-Computings werden beim Edge-Computing näher an die Sensoren gerückt, also dorthin wo tatsächlich Daten generiert werden. Funktionen wie die Verarbeitung, Speicherung, Kommunikation und Entscheidungsfindung werden im unmittelbaren Umfeld der verknüpften Geräte angesiedelt³⁵. Der Begriff steht für eine Vielzahl an Technologien und lässt sich zusammenfassen als „Alles, was nicht ein Cloud Datacenter ist“³⁶.

Ein anderer Ansatz, der das Internet als Infrastruktur voraussetzt und bereits 2002 vorgestellt wurde, sind Content Delivery Networks (CDN)³⁷. Häufig angeforderte Inhalte werden an den logischen Kanten des Netzwerkes zwischengespeichert. Besonders bei Inhalten mit Videomaterial kann das Caching viel Bandbreite sparen. Edge-Computing erweitert das Konzept, indem an den Kanten des Netzwerkes nicht nur Daten zwischengespeichert sondern beliebiger Anwendungscode ausgeführt werden kann³⁸. Ein Beispiel ist die in Abbildung 3-1 dargestellte **Edge-Cloud**. Werden Ressourcen häufig gebraucht oder müssen viele Daten zu diesen Ressourcen transportiert werden, können diese an den Rand der Cloud ausgelagert werden. Der Zugriff zur Edge-Cloud ist schneller als der zur Core-Cloud und damit für entsprechende Applikationen besser geeignet.

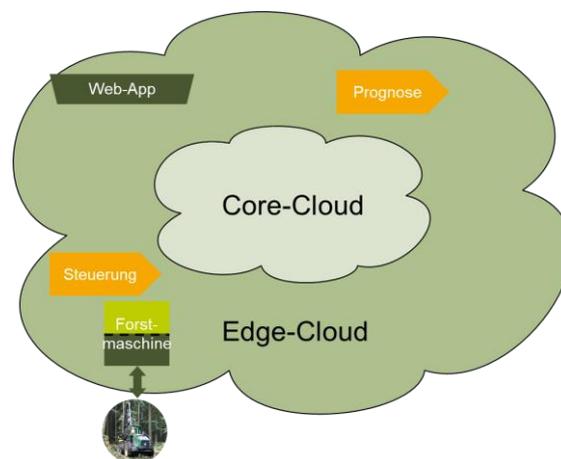


Abbildung 3-1: Beispiel der Edge-Cloud.

Im Folgenden werden die wichtigsten Konzepte vorgestellt, die Edge-Computing umsetzen. Die Konzepte haben sich aus unterschiedlichen Bereichen (Industrie, Mobilfunk) entwickelt, überschneiden sich deutlich, aber kommen zu demselben Ziel. Teilweise sind sie nicht klar voneinander zu trennen oder bauen aufeinander auf.

³⁵ Frost & Sullivan, Verlagerung in die Peripherie: Edge Computing entwickelt sich zur disruptiven Technologie der Zukunft in der Industrieautomatisierung. [Online]. Verfügbar unter: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/themenfelder/industrial-edge.html>.

³⁶ A. Reznik, What is Edge? [Online]. Verfügbar unter: <https://www.etsi.org/newsroom/blogs/entry/what-is-edge>. Zugriff am: 1. August 2019.

³⁷ J. Dilley et al., „Globally distributed content delivery: IEEE Internet Computing“, IEEE Internet Computing, Jg. 6, Nr. 5, S. 50–58, 2002, doi: 10.1109/MIC.2002.1036038.

³⁸ M. Satyanarayanan, „The Emergence of Edge Computing“, Computer, Jg. 50, Nr. 1, S. 30–39, 2017, doi: 10.1109/MC.2017.9.

3.1 Mobile Cloud-Computing

Mobile Cloud-Computing (MCC) verbindet Mobile Computing, Cloud und mobiles Internet³⁹. Für mobile Geräte soll der Cloud-Zugriff erleichtert werden. Punkte, die durch das Doppelrechnersystem aus Cloud und Endgerät verbessert werden sollen, sind beispielsweise der Energieverbrauch des Endgeräts und die Abstimmung zwischen Berechnung und Kommunikation⁴⁰. Dabei muss eine geeignete Aufteilung zwischen Berechnungen auf dem Endgerät oder Kommunikation in die Cloud gefunden, Leistungen des Endgeräts (z.B. Akkulaufzeit, Speicher und Bandbreite) und die Umgebung (z.B. Heterogenität, Skalierbarkeit und Verfügbarkeit) berücksichtigt, dabei die „Quality-of-Service“ der Anwendungen und die „Quality-of-Experience“ der Nutzer konstant hochgehalten sowie Sicherheit (z.B. Zuverlässigkeit und Datenschutz) gewährleistet werden⁴¹. Mit diesen Problemen befassen sich eigene wissenschaftliche Arbeiten⁴².

Eine Umsetzung von MCC sind „Cloudlets“ – architektonische Elemente, die die mittlere Ebene zwischen mobilen Endgeräten und der Cloud bilden. Sie werden als „Rechenzentrum in einer Box“ betrachtet und sollen die „Cloud näher bringen“⁴³. Cloudlets sind eigenständige, selbstverwaltende Einheiten, die auf Cloudtechnologien basieren und ausgelagerten Code von mobilen Geräten in virtuellen Maschinen (VMs) oder anderen virtuellen Containern wie Docker-Container verarbeiten⁴⁴. Sie sind schneller als reine Cloud-Lösungen⁴⁵ weil nur ein Übertragungsschritt vom mobilen Endgerät bis zur verarbeitenden Ressource nötig ist⁴⁶. Die Latenz der Anwendungen wird so gering gehalten und Verbindungsausfälle werden vermieden, sodass ein zufriedenstellendes Nutzererlebnis erreicht wird⁴⁷. Als vorgelagerter Knoten verringern Cloudlets außerdem den Datenstrom in die Cloud indem Daten vorverarbeitet werden⁴⁸.

Die Carnegie Mellon Universität entwickelt mit dem Softwareprojekt OpenStack++ eine Architektur für Cloudlets⁴⁹. Aufbauend auf OpenStack, einer open-source Umgebung für Cloud-Computing, werden Frameworks für Cloudlets bereitgestellt, sodass Anwender Cloudlet-Strukturen für ihre Applikationen nutzen können. Der Code ist frei verfügbar⁵⁰ und es gibt bereits einige Anwendungen die darauf aufbauen⁵¹.

³⁹ P. Asrani, „Mobile cloud computing“, International Journal of Engineering and Advanced Technology, Jg. 2, Nr. 4, S. 606–609, 2013.

⁴⁰ D. Huang, „Mobile cloud computing“, IEEE COMSOC Multimedia Communications Technical Committee (MMTC) E-Letter, Jg. 6, Nr. 10, S. 27–31, 2011.

⁴¹ H. T. Dinh, C. Lee, D. Niyato und P. Wang, „A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches“, Wireless communications and mobile computing, Jg. 13, Nr. 18, S. 1587–1611, 2013.

⁴² B.-G. Chun, S. Ihm, P. Maniatis, M. Naik und A. Patti, Hg., Clonecloud: elastic execution between mobile device and cloud. ACM: ACM, 2011. E. Cuervo et al., Hg., MAUI: making smartphones last longer with code offload. ACM: ACM, 2010.

⁴³ S. Kosta, A. Aucinas, P. Hui, R. Mortier und X. Zhang, Hg., Thinkair: Dynamic resource allocation and parallel execution in the cloud for mobile code offloading. IEEE: IEEE, 2012.

⁴⁴ M.-R. Ra et al., Hg., Odessa: enabling interactive perception applications on mobile devices. ACM: ACM, 2011.

⁴⁵ R. Kemp, N. Palmer, T. Kielmann und H. Bal, Hg., Cuckoo: a computation offloading framework for smartphones. Springer: Springer, 2010.

⁴⁶ M. Satyanarayanan, Elijah Cloudlet-based Edge Computing: Gabriel Wearable Cognitive Assistance using Cloudlets. [Online]. Verfügbar unter: <http://elijah.cs.cmu.edu/>. Zugriff am: 29. Juli 2019.

⁴⁷ B. I. Ismail et al., Hg., Evaluation of Docker as Edge computing platform. 2015 IEEE Conference on Open Systems (ICOS), 2015.

⁴⁸ K. Ha et al., Hg., The impact of mobile multimedia applications on data center consolidation. IEEE: IEEE, 2013.

⁴⁹ M. Satyanarayanan, „The Emergence of Edge Computing“, Computer, Jg. 50, Nr. 1, S. 30–39, 2017, doi: 10.1109/MC.2017.9.

⁵⁰ H. Wu, K. Wolter und A. Grazioli, Hg., Cloudlet-based mobile offloading systems: a performance analysis, 2013.

⁵¹ M. Satyanarayanan et al., Hg., Cloudlets: at the leading edge of mobile-cloud convergence. IEEE: IEEE, 2014.

⁵² W. Shi und S. Dustdar, „The Promise of Edge Computing“, Computer, Jg. 49, Nr. 5, S. 78–81, 2016, doi: 10.1109/MC.2016.145.

⁵³ K. Ha und M. Satyanarayanan, „OpenStack++ for Cloudlet Deployment“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://pdfs.semanticscholar.org/e928/1f322340420a0910eb37108cda1a98f2b73a.pdf?_ga=2.176619877.1144717820.1564587934-1398367067.1563465663

⁵⁴ <https://github.com/cmusatyalab/elijah-provisioning>, <https://github.com/cmusatyalab/elijah-openstack>

⁵⁵ K. Ha et al., Hg., Towards wearable cognitive assistance. ACM: ACM, 2014.

Microsoft entwickelt Cloudlets unter dem Begriff Micro-Datenzentrum weiter⁵². Microsoft setzt die Techniken zur Unterstützung bei Anwendungen wie Gesichts- und Spracherkennung und App- und Game-Streaming aus der Cloud ein.

3.2 Mobile Edge-Computing

Mobile Edge-Computing (MEC) wendet Edge-Computing auf das Mobilfunknetz an. MEC bietet eine IT-Service-Umgebung und Cloud-Computing-Fähigkeiten am Rande des Mobilfunknetzes, innerhalb des Funkzugangsnetzes (Radio Access Network, RAN) und in unmittelbarer Nähe zu mobilen Teilnehmern⁵³.

Schlüsselement der Architektur ist der MEC-Applikationsserver am Rande des Netzwerks, der mit den Endgeräten verbunden ist und Zugriff auf die lokalen Ressourcen hat. So kann beispielsweise Maschine-zu-Maschine-Kommunikation einfach umgesetzt werden⁵⁴. Der MEC-Applikationsserver bietet den Endgeräten Rechenressourcen, Speicherkapazität, Konnektivität und Zugriff auf Netzwerk-Informationen. Da der Server nicht mit anderen Netzen verbunden ist, ist er weniger anfällig für Angriffe von außen.

MEC ist von der europäischen 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) Forschungseinrichtung als eine der aufkommenden Schlüsseltechnologien für 5G-Netzwerke anerkannt (zusammen mit Network Functions Virtualization (NFV) und Software-Defined Networking (SDN))⁵⁵.

Die Technologie wird vom European Telecommunications Standards Institut (ETSI) in der Industrie Specification Group (ISG) standardisiert⁵⁶. Ziel ist es eine standardisierte und offene Umgebung zu schaffen, die eine effiziente und nahtlose Integration von Applikationen über alle Mobile Edge-Computing-Anbieter ermöglicht. ETSI sieht Mobile Edge-Computing auch als Möglichkeit, neue Wertschöpfungsketten, Geschäftsmöglichkeiten und Anwendungen für das Mobilfunknetz zu schaffen. Konkrete Anwendungen von MEC werden hier im Rahmen von Fallstudien realisiert. Mit einer standardisierten API sollen Innovationen stimuliert werden. ETSI ISG MEC fördert außerdem Proof-of-Concepts, um die Realisierbarkeit von MEC-Implementationen zu zeigen.

3.3 Fog-Computing

Neben den Ansätzen aus dem Mobilfunk gibt es auch im industriellen Umfeld Ansätze, Edge-Computing umzusetzen. Die Herausforderungen überschneiden sich mit denen aus dem Mobilfunk. Diese sind:

⁵² V. Bahl, „Emergence of micro datacenter: (Cloudlets/edge) for mobile computing“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2016/11/Micro-Data-Centers-mDCs-for-Mobile-Computing-1.pdf>

⁵³ Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher und V. Young, „Mobile edge computing — A key technology towards 5G“, ETSI white paper, Jg. 11, Nr. 11, S. 1–16, 2015.

⁵⁴ N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi und T. Skeie, „Mobile edge computing: A survey“, IEEE Internet of Things Journal, Jg. 5, Nr. 1, S. 450–465, 2017.

⁵⁵ The 5G Infrastructure Public Private Partnership, 5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services. [Online]. Verfügbar unter: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>.

⁵⁶ Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher und V. Young, „Mobile edge computing — A key technology towards 5G“, ETSI white paper, Jg. 11, Nr. 11, S. 1–16, 2015.

- **Immer mehr Dinge** Die Anzahl an verbundenen IoT-Geräten wächst stetig⁵⁷. Zwischen den Jahren 2018 bis 2024 wird eine jährliche Wachstumsrate von 17 % bei den IoT-Verbindungen prognostiziert⁵⁸. Im Hinblick auf zentrale Verbindungsknoten, wie Cloud-Server, gibt es bei diesen Aussichten Bedenken. Werden alle Geräte von den Cloud-Servern identifiziert, authentifiziert und verbunden, steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Überforderung der zentralen Netze und des Netzausfalls. Fraglich ist, ob ein zentrales Kommunikationsmodell, also ein Server mit dem viele Clients verbunden sind, auf die wachsende Anzahl an verbundenen IoT-Geräten skalierbar ist⁵⁹ und bezahlbar bleibt⁶⁰. Begrenzt ist die Skalierbarkeit in jedem Fall durch die Backend-Infrastrukturen wie Server und Datenzentren der Cloud-Anbieter⁶¹.
- **Echtzeitanwendungen** Echtzeit-Dienste und zeitkritische Anwendungen sind in allen Branchen gefragt. Im Cluster Wald und Holz ist beispielsweise der Nährungsalarm, der bei Missachtung von Sicherheitsabständen zu Forstmaschinen ausgelöst wird, ein Dienst, der in Echtzeit ausgeführt werden sollte. Ein zentraler Dienst eignet sich hier nicht, da durch die Datenübertragung zu den zentralen Knoten erhöhte Verzögerungszeiten und Jitter auftreten.
- **Interoperabilität** Die Vielfalt der Maschinenhersteller hemmt die Entwicklung einer uneingeschränkten Maschine-zu-Maschine-Kommunikation. Es gibt keine einzige Plattform, die alle Geräte miteinander verbindet, und keine Garantie dafür, dass die von verschiedenen Herstellern angebotenen Cloud-Services interoperabel und kompatibel sind⁶².
- **Privacy, Security** Solange zentralisierte Architekturen wie beim Cloud-Computing genutzt werden, müssen Daten zwischen den zentralen Rechenzentren und Geräten übertragen werden. Werden die zentralen Rechenzentren dabei von Dritten betrieben, verwalten diese die Daten und haben Zugriff darauf. Im Hinblick auf die Datentransparenz fehlt den Teilnehmer die Information, wo und wie die Daten verwendet werden⁶³. Fragen zu Datenschutz, Privatsphäre, Lizenzierung, Kontrolle und Besitz von Daten werden aufgeworfen⁶⁴.

⁵⁷ P. K. Sharma, M.-Y. Chen und J. H. Park, „A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT“, IEEE Access, Jg. 6, 115–124, 2017.

B. Dickson, *Decentralizing IoT networks through blockchain*. [Online]. Verfügbar unter: https://techcrunch.com/2016/06/28/decentralizing-iot-networks-through-blockchain/?guccounter=1&guce_referrer_us=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2x1LmNvbS8&guce_referrer_cs=Uz-zoJPRgz4NKchGpWg6pig.

⁵⁸ Ericsson, „Ericsson Mobility Report: November 2018“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/491e34/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-november-2018.pdf>

⁵⁹ A. Mukherjee, H. S. Paul, S. Dey und A. Banerjee, „ANGELS for distributed analytics in IoT“ in 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2014, S. 565–570, doi: 10.1109/WF-IoT.2014.6803230.

A. Mukherjee, H. S. Paul, S. Dey und A. Banerjee, „ANGELS for distributed analytics in IoT“ in 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2014, S. 565–570, doi: 10.1109/WF-IoT.2014.6803230.

Z.-K. Zhang *et al.*, *Hg., IoT security: ongoing challenges and research opportunities*. IEEE: IEEE, 2014.

⁶⁰ B. Dickson, *Decentralizing IoT networks through blockchain*. [Online]. Verfügbar unter: https://techcrunch.com/2016/06/28/decentralizing-iot-networks-through-blockchain/?guccounter=1&guce_referrer_us=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2x1LmNvbS8&guce_referrer_cs=Uz-zoJPRgz4NKchGpWg6pig.

⁶¹ IoTEx Team, „IoTEx: A Decentralized Network for Internet of Things Powered by a Privacy-Centric Blockchain“, Version 1.5, 2018.

P. K. Sharma, M.-Y. Chen und J. H. Park, „A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT“, IEEE Access, Jg. 6, 115–124, 2017.

B. Dickson, *Decentralizing IoT networks through blockchain*. [Online]. Verfügbar unter: https://techcrunch.com/2016/06/28/decentralizing-iot-networks-through-blockchain/?guccounter=1&guce_referrer_us=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2x1LmNvbS8&guce_referrer_cs=Uz-zoJPRgz4NKchGpWg6pig.

Ericsson, „Ericsson Mobility Report: November 2018“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/491e34/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-november-2018.pdf>

A. Mukherjee, H. S. Paul, S. Dey und A. Banerjee, „ANGELS for distributed analytics in IoT“ in 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2014, S. 565–570, doi: 10.1109/WF-IoT.2014.6803230.

⁶² B. Dickson, *Decentralizing IoT networks through blockchain*. [Online]. Verfügbar unter: https://techcrunch.com/2016/06/28/decentralizing-iot-networks-through-blockchain/?guccounter=1&guce_referrer_us=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2x1LmNvbS8&guce_referrer_cs=Uz-zoJPRgz4NKchGpWg6pig.

⁶³ A. Reyna, C. Martín, J. Chen, E. Soler und M. Díaz, „On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities“, *Future Generation Computer Systems*, Jg. 88, S. 173–190, 2018, doi: 10.1016/j.future.2018.05.046.

⁶⁴ L. Hertig, *Hidden Blockchain Opportunities (3): Decentralized Cloud Storage*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plesk.com/blog/product-technology/hidden-blockchain-opportunities-3-decentralized-cloud-storage/>.

- **Anforderungen an Ausfall** Werden immer mehr kritische Aufgaben, wie z.B. die menschliche Gesundheit, vom IoT abhängig, rückt die Ausfallsicherheit in den Vordergrund. Cloud-Server und andere zentrale Datenpunkte stellen hier als „Single-Point-Of-Failure“ ein Risiko dar⁶⁵.

In der Fertigung werden öffentliche Clouds aus diesen Gründen kaum verwendet. Besonders die hohen Latenzzeiten, die Weitergabe der Daten an Dritte und der Preis sprechen in der Fertigung gegen Cloud-Computing. Die meisten Akteure verlassen sich hier auf ihre firmeneigene Infrastruktur⁶⁵.

Im industriellen Umfeld wird zum Lösen der Herausforderungen von großen Datenmengen, Heterogenität und Latenzzeit, die in einigen Cloud-Ökosystemen zu beobachten ist, **Fog-Computing** vorgeschlagen. Die Verarbeitungseinheiten wie Smartphones, Sensorknoten, Wearables und On-Board-Einheiten werden dabei an den Rand des Netzwerks gelegt. Im Gegensatz zum reinen Edge-Computing, was die Cloud komplett ausschließt³⁶, verbindet Fog-Computing die Technologien und schafft eine Ebene zwischen Cloud und Edge. Dort werden dann Datenanalyse und Wissensgenerierung durchgeführt. Die Notwendigkeit eines zentralen Systems entfällt⁶⁶. Fog-Computing wurde 2012 von F. Bonomi und weiteren Mitarbeitern der Cisco Systems Inc. in einem Paper⁶⁷ vorgestellt. Fog-Computing erweitert das Cloud-Computing-Paradigma auf den Rand des Netzwerks und ermöglicht so eine neue Art von Anwendungen und Diensten. Definierende Merkmale von Fog-Computing sind:

- a) Geringe Latenz und Ortsbewusstsein
- b) Weite geografische Verteilung
- c) Mobilität
- d) Sehr große Anzahl von Knoten
- e) Überwiegende Rolle des drahtlosen Zugangs
- f) Starke Präsenz von Streaming- und Echtzeitanwendungen
- g) Heterogenität

Die Eigenschaften werden erreicht, indem eine Vielzahl von kollaborierenden Endnutzern oder benutzernahen Edge-Geräten (Smartphone, Smartwatch ...) eine beträchtliche Menge an Speicherplatz (statt primär in Cloud-Rechenzentren gespeichert), Kommunikation (statt über Backbone-Netzwerke geleitet) und Steuerung, Konfiguration, Messung und Verwaltung bereitstellen⁶⁸.

Das OpenFog-Konsortium⁶⁹ hat im Februar 2017 eine Referenzarchitektur für Fog-Computing veröffentlicht. Diese wurde 2018 von der IEEE Standards Association (IEEE-SA) als offizieller Standard (IEEE 1934) übernommen. Acht Kernprinzipien stellen die Schlüsselattribute dar, die ein System umfassen muss, um als „OpenFog“ definiert zu werden. Dies sind Sicherheit, Skalierbarkeit, Offenheit, Autonomie, RAS (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wartbarkeit), Agilität, Hierarchie und Programmierbarkeit.

⁶⁵ Frost & Sullivan, *Verlagerung in die Peripherie: Edge Computing entwickelt sich zur disruptiven Technologie der Zukunft in der Industrieautomatisierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/themenfelder/industrial-edge.html>.

⁶⁶ H. El-Sayed et al., „Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment“, *IEEE Access*, Jg. 6, S. 1706–1717, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2780087.

⁶⁷ Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, and Sateesh Addepalli. 2012. Fog computing and its role in the internet of things. In *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing (MCC '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 13–16. DOI:<https://doi.org/10.1145/2342509.2342513>

⁶⁸ M. Chiang, „Fog Networking: An Overview on Research Opportunities“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.00835.pdf>

⁶⁹ OpenFog Consortium Architecture Working Group, „OpenFog reference architecture for fog computing“, *OPFRA001*, Jg. 20817, S. 162, 2017.

Ein zentraler Punkt in der Umsetzung von Fog-Computing ist das Managen und Verwalten der Ressourcen. Ansätze dafür sind in verschiedensten Publikationen zu finden⁷⁰. Konkrete Realisierungen von Fog-Computing sind in diversen Bereichen zu finden, die mit Vernetzung zusammenhängen. Es sind beispielsweise Publikationen im Bereich von Smart Vehicle⁷¹, Smart Grids⁷², Smart Cities, Gesundheitsmonitoring⁷³ und Wireless Sensors and Actuators Networks (WSAN)⁷⁴ vorhanden. Die Anwendungen bedienen sich dabei teilweise quelloffenen Tools wie das bereits bei Cloudlets erwähnte OpenStack und virtueller Maschinen⁷⁵.

3.4 Blockchain als Plattform

Zur Umsetzung verteilter Peer-to-Peer-Kommunikationsnetze wird aktuell die Blockchain-Technologie als zukunftsweisend gesehen. Professor Wolfgang Prinz vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik sieht die Blockchain-Technologie in der Lage, eine „neue Generation des Internets einzuleiten: [...] ein Internet of Trust and Value“. Nach Prinz werden „alle Bereiche betroffen sein, deren Geschäftsmodell auf Netzwerktransaktionen beruht. Bei immer stärker vernetzten Produktionsprozessen gilt dies somit für fast alle Branchen“⁷⁶.

⁷⁰ S. K. Datta, C. Bonnet und J. Haerri, Hg., Fog computing architecture to enable consumer centric internet of things services. IEEE: IEEE, 2015.

A. Mtibaa, K. Harras und H. Alnuweiri, Hg., Friend or foe? Detecting and isolating malicious nodes in mobile edge computing platforms. IEEE: IEEE, 2015.

Y. Sun, X. Qiao, B. Cheng und J. Chen, Hg., A low-delay, lightweight publish/subscribe architecture for delay-sensitive iot services. IEEE: IEEE, 2013.

Y. Teranishi, R. Banno und T. Akiyama, Hg., Scalable and locality-aware distributed topic-based pub/sub messaging for iot. IEEE: IEEE, 2015.

⁷¹ S. Chun et al., „A Pub/Sub-Based Fog Computing Architecture for Internet-of-Vehicles“ in 2016 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), Luxembourg City, 2016, S. 90–93, doi: 10.1109/CloudCom.2016.0029.

S. K. Datta, C. Bonnet und J. Haerri, „Fog Computing architecture to enable consumer centric Internet of Things services“ in 2015 IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), Madrid, Spain, 2015, S. 1–2, doi: 10.1109/ISCE.2015.7177778.

J. Kang, R. Yu, X. Huang und Y. Zhang, „Privacy-Preserved Pseudonym Scheme for Fog Computing Supported Internet of Vehicles“, IEEE Trans. Intell. Transport. Syst., Jg. 19, Nr. 8, S. 2627–2637, 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2764095.

W. Zhang, Z. Zhang und H.-C. Chao, „Cooperative Fog Computing for Dealing with Big Data in the Internet of Vehicles: Architecture and Hierarchical Resource Management“, IEEE Commun. Mag., Jg. 55, Nr. 12, S. 60–67, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1700208.

⁷² C. Wei, Z. M. Fadlullah, N. Kato und I. Stojmenovic, „On optimally reducing power loss in micro-grids with power storage devices“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Jg. 32, Nr. 7, S. 1361–1370, 2014.

W. Zhang, Z. Zhang und H.-C. Chao, „Cooperative Fog Computing for Dealing with Big Data in the Internet of Vehicles: Architecture and Hierarchical Resource Management“, IEEE Commun. Mag., Jg. 55, Nr. 12, S. 60–67, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1700208.

[51] C. Wei, Z. M. Fadlullah, N. Kato und I. Stojmenovic, „On optimally reducing power loss in micro-grids with power storage devices“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Jg. 32, Nr. 7, S. 1361–1370, 2014.

[52] Y. Cao, P. Hou, D. Brown, J. Wang und S. Chen, Hg., Distributed analytics and edge intelligence: Pervasive health monitoring at the era of fog computing. ACM: ACM, 2015.

[53] Board of Trustees Princeton University, Fog networks: Research Papers. [Online]. Verfügbar unter: <http://fognetworks.org/researchpapers/>.

[54] S. Yi, Z. Hao, Z. Qin und Q. Li, Hg., Fog Computing: Platform and Applications. 2015 Third IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb), 2015.

[55] W. Prinz, Blockchain und die Auswirkungen auf die Industrie 4.0. Verfügbar unter: <https://www.innovationsforum.fraunhofer.de/2018/04/blockchain-und-die-auswirkungen-auf-die-industrie-4-0/>. Zugriff am: 7. August 201

⁷³ Y. Cao, P. Hou, D. Brown, J. Wang und S. Chen, Hg., Distributed analytics and edge intelligence: Pervasive health monitoring at the era of fog computing. ACM: ACM, 2015.

⁷⁴ K. Ha et al., Hg., Towards wearable cognitive assistance. ACM: ACM, 2014.

Board of Trustees Princeton University, Fog networks: Research Papers. [Online]. Verfügbar unter: <http://fognetworks.org/researchpapers/>.

⁷⁵ S. Yi, Z. Hao, Z. Qin und Q. Li, Hg., Fog Computing: Platform and Applications. 2015 Third IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb), 2015.

⁷⁶ W. Prinz, Blockchain und die Auswirkungen auf die Industrie 4.0. Verfügbar unter: <https://www.innovationsforum.fraunhofer.de/2018/04/blockchain-und-die-auswirkungen-auf-die-industrie-4-0/>. Zugriff am: 7. August 2019.

4 Wo leben die WH4.0-Dinge?

Die Entscheidung über die IT-Architektur für Wald und Holz 4.0 ist keine Entweder-Oder-Entscheidung zwischen Cloud und Edge. Die beiden Technologien schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich, wie Cloudlets zeigen. Die Kombination von Edge und Cloud stellt eine Win-Win-Situation dar. Verteilte Computersysteme, die sowohl über Cloud- als auch über Edge-Fähigkeiten verfügen, können unterschiedliche anwendungsspezifischen Anforderungen abdecken. Cloud-Systeme bringen Rechenleistung in das Netzwerk, die von Big-Data-Anwendungen benötigt werden. Edge-Technologien bringen schnelle und sichere Datenverarbeitung.

Die Wald und Holz 4.0-Architektur und -Infrastruktur sollte sich an die Bedürfnisse der Teilnehmer anpassen, alle benötigten Technologien zur Verfügung stellen und eine flexible Struktur für technische Erweiterungen haben. Je nach Anforderungen könnten Cloud-Komponenten beispielsweise einen zentralen Speicher zur Verfügung stellen, der auf jede Größe skalierbar ist und Daten speichert auf die nicht in Echtzeit zugegriffen werden muss. Die Cloud könnte außerdem genutzt werden, um kurzfristig viel Rechenleistung zur Verfügung zu stellen. Anwendungen, die eine hohe Rechenleistung bei gleichzeitig geringer Latenzzeit haben, können in Cloudlets oder andere Fog-Knoten ausgelagert werden.

Die Wald und Holz 4.0-Infrastruktur ist daher eine Kombination aus den vorgestellten Konzepten. In Abbildung 4-1 ist beispielhaft die Systemkonfiguration dargestellt, die für das Anwendungsszenario „Motormanuelle Holzernte“ notwendig ist. WH4.0-Dinge, die Cloud-Computing als Grundlage nutzen, sind mit einem Wolken-Symbol gekennzeichnet, die anderen nutzen Edge-Technologien. Je nach Anwendung werden die am besten geeigneten Konzepte verwendet. Ein modularer Aufbau mit standardisierten Schnittstellen sorgt für Flexibilität und erleichtert den Aufbau. Grundelement dieses Aufbaus ist ein Verzeichnis, in dem Personen und Dinge aufgelistet sind, sowie die Informationen, wie diese erreicht werden können. Das Verzeichnis erlaubt eine Verbindung von Cloud und Edge in einem Infrastrukturnetz, indem alle erforderlichen Informationen zur Kommunikation zwischen den Teilnehmern (Endpunkten) in diesem Verzeichnis dargestellt werden. Unabhängig davon, ob die Knoten zentral oder verteilt organisiert sind, sie stellen Daten und Dienste zur Verfügung und lassen sich mit den gleichen standardisierten Schnittstellen erreichen.

