

1 Sicherheit im Industriellen Internet der Dinge

Die Digitalisierung durchdringt alle Branchen und führt zu tiefgreifenden Veränderungen von Geschäftsmodellen und technischen Infrastrukturen. Insbesondere in Logistik und Produktion bietet die Vernetzung von Geräten und der Austausch von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg die Chance, Abläufe zu beschleunigen, Kosten zu reduzieren und Medienbrüche zu vermeiden. Das hierbei entstehende *Industrielle Internet der Dinge* (IIoT) bringt jedoch völlig neue Anforderungen an den Datenschutz und die Sicherheit der technischen Infrastrukturen mit sich. Diese Anforderungen adressiert die Initiative des „Industrial Data Space“ mit dem Trusted Connector.

Datenschutz Im industriellen Internet der Dinge (IIoT) werden Daten über Unternehmensgrenzen hinweg ausgetauscht. Unternehmensgrenzen sind dabei auch meist Vertrauensgrenzen, aus denen Daten herausgegeben werden. Hierzu zählen auch und insbesondere sensible Daten, aus denen sich Rückschlüsse über Geschäftsgeheimnisse ziehen lassen, wie beispielsweise Angaben über verfügbare Produktionskapazitäten, Lieferketten oder Wartungsdaten von Sensoren. Aber auch persönliche Daten wie Bewegungsprofile oder Gesundheitsdaten werden herangezogen und für Analysezwecke verarbeitet.

Zeitgleich sehen sich Unternehmen einer verschärften Datenschutzgesetzgebung gegenüber, nach der die Auskunft über den Verbleib persönlicher Daten und ihre Löschung auf Verlangen des Benutzers jederzeit möglich sein muss.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Architekturen für das Internet der Dinge die Herkunft von Daten verfolgen und es Benutzern ermöglichen, nicht nur den Zugriff, sondern auch die Art und Weise der Verarbeitung von Daten zu kontrollieren.

Sicherheit Wie die jüngste Vergangenheit gezeigt hat, sind eingebettete Systeme im Internet der Dinge häufig Einfallstor für Schadsoftware und Eintrittspunkt für gezielte Angriffe auf die interne Infrastruktur. Veraltete Software, das Fehlen von sicheren Update-Mechanismen sowie die Langlebigkeit solcher Geräte lassen sie zu einem attraktiven Ziel für Angreifer werden.

Verwundbarkeiten lassen sich niemals völlig ausschließen. In heterogenen Infrastrukturen kommt jedoch die Herausforderung hinzu, dass das Sicherheitsniveau eines Kommunikationspartners initial vollkommen unbekannt ist und zunächst ein gegenseitiges Vertrauen etabliert werden muss. Hierzu ist es erforderlich, dass sich Kommunikationspartner ihr technisches Sicherheitsniveau automatisch nachweisen, so dass auf dieser Basis verlässlich beurteilt werden kann, ob und welche Daten mit dem jeweiligen Kommunikationspartner geteilt werden dürfen.

Infrastrukturen für das industrielle Internet der Dinge

müssen daher einerseits Geräte unterschiedlicher Sicherheitslevel zulassen, gleichzeitig jedoch Mechanismen anbieten, über die Diensteanbieter die Verwendung ihrer Daten auf weniger sicheren Plattformen zuverlässig einschränken können.

Vertrauen Der Austausch von sensiblen Daten erfordert Vertrauen in die Teilnehmer, aber auch in die technische Infrastruktur selbst. Die Tatsache, dass Low-Cost-Geräte wie Kameras oder Sensoren kompromittiert und für Angriffe auf kritische IT-Infrastrukturen genutzt werden können, bedroht nicht nur die Sicherheit des Gesamtsystems. Sie wirft auch die Frage auf, inwieweit Daten, die von solchen Geräten stammen, vertraut werden kann und ob sie zuverlässig genug sind, um auf ihrer Basis automatische Entscheidungen zu treffen. Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg bedeutet meist auch Datenaustausch über die eigenen Vertrauensgrenzen hinweg. Es sind daher Maßnahmen erforderlich, durch die das Vertrauen in die Sicherheit der Komponenten im industriellen Internet der Dinge nicht nur gesteigert, sondern nachweisbar quantifizierbar wird. Erst durch eine automatische und zuverlässige Attestierung des Sicherheitsniveaus einer Komponente können Diensteanbieter entscheiden, ob sie Daten für diese Komponente freigeben. Der Industrial Data Space ist eine Initiative der Industrie und der Fraunhofer-Gesellschaft zum Aufbau einer Infrastruktur für den sicheren Austausch von IIoT-Daten. Der Trusted Connector („Konnektor“) bietet hierbei einen Software-Stack für vertrauenswürdige Edge-Gateways, die sowohl im Industrial Data Space, aber auch in anderen IIoT-Infrastrukturen eingesetzt werden können. Je nach Ausprägung kann der Trusted Connector-Stack zum Aufbau von sicheren eingebetteten Edge-Devices mit oder ohne Hardware-Vertrauensanker oder als ressourcenstarker Cloud-Dienst für das Hosting anspruchsvoller Datenanalyse-Anwendungen eingesetzt werden. Er wurde im Hinblick auf typische Sicherheitsanforderungen des IIoT entworfen und bietet Lösungen für das Identitätsmanagement von Teilnehmern und Gateways, geschützte Ausführungsumgebungen für Anwendungen, sowie eine benutzerzentrische Kontrolle über den Zugriff auf Daten und die Art und Weise ihrer Nutzung.

2 Sicherheitseigenschaften des Trusted Connector

Der Trusted Connector spezifiziert eine Softwareplattform für vertrauenswürdige, sichere IIoT-Gateways. Diese sind die Schnittstelle zwischen Datenquellen wie physischen Sensoren und der externen Datenaustauschplattform. Während letztere in vielen Fällen durch eine zentrale Cloud-Anwendung realisiert wird, legt der Industrial Data Space seinen Schwerpunkt auf die Datensouveränität und vermeidet eine zentrale Datenhaltung durch eine zwangsweise vertrauenswürdige Stelle. Statt dessen werden Daten lokal im Connector vorgehalten und über direkte Verbindungen zwischen Datenanbieter und -nutzer ausgetauscht. Neben der eigentlichen Vermittlung von Daten sind IIoT-Gateways für die Vorverarbeitung (Aggregation, Filterung), das Message-Routing, die Bereitstellung von Diensten in der IIoT-Infrastruktur und die Herstellung sicherer Konnektivität verantwortlich. Gleichzeitig müssen Konnektoren eine große Bandbreite von Deployment-Varianten abdecken: Die Referenzimplementierung des Trusted Connector ist daher nicht an eine bestimmte Hardware gebunden, sondern kann aktuell bereits auf ARM, x86 und PowerPC-Plattformen aufgesetzt werden.

Anforderungen an sichere eingebettete IIoT-Gateways wurden u.a. durch Microsoft definiert¹ Die folgende Tabelle zeigt, wie diese Anforderungen durch den Trusted Connector erfüllt werden. Tatsächlich geht der Trusted Connector jedoch über diese Anforderungen hinaus, da er verschiedene Hardware-Plattformen und damit auch verschiedene Sicherheitsstufen zulässt, die dem jeweiligen Kommunikationspartner kommuniziert und nachgewiesen werden können.

Anforderung	Motivation/Umsetzung
Hardware-based Root of Trust	<i>Geräte benötigen eine nicht-fälschbare und nicht-übertragbare eindeutige Identität. Schlüsselmaterial wird durch Hardware-Vertrauensanker geschützt.</i> SCDaemon-Komponente abstrahiert Zugriff auf Schlüsselmaterial und Zertifikate von zugrundeliegender Software/Hardware.
Small Trusted Computing Base	<i>Funktionen sollten auf einer möglichst kleinen vertrauenswürdigen Basis aufbauen.</i> Vertrauenswürdige Basis sind Kernel & Container Management Layer.
Defense in Depth	<i>Ergänzende Sicherheitsfunktionalitäten in mehreren Schichten zur Abwehr von Angriffen.</i> Whitelist-basierte Integritätsschutzmaßnahmen (Secure Boot, Container-Integritätsverifikation), Remote-Integritätsnachweis, Least-Privilege-based Isolation.
Compartmentalization	<i>Funktionen dürfen sich nicht gegenseitig beeinflussen. Ein Fehler in einer Funktion darf keine Auswirkungen auf andere Funktionen haben.</i> Isolation von Apps in Linux-Containern, Least-Privilege-based Isolation mittels Linux Security Module (LSM).
Certificate-based Authentication	<i>Geräte müssen sich sicher und nicht-interaktiv – also ohne Eingabe von Passwörtern – authentisieren können.</i> Automatisch ausgestellt ACME-Zertifikate für vertrauliche Kommunikation, Nicht-interaktiver Nachweis von Identitätsattributen mittels OAuth2.0 und Attribute Provider.
Renewable Security	<i>Fehlerhafte Komponenten müssen im Betrieb aktualisiert werden können.</i> Remote-Aktualisierung von Container-Images und Kernel
Reporting	<i>Fehler und sicherheitskritische Ereignisse müssen nicht-abstreitbar aufgezeichnet werden.</i> Eventbasiertes Audit-Log mit Integritätsnachweis.

Kommunikation Konnektoren etablieren einen sicheren Kommunikationskanal zwischen Endpunkten. Neben Verschlüsselung und Schutz der Datenintegrität muss im Rahmen der Kommunikation das Sicherheitsniveau des Gegenübers nachgewiesen werden. Je nach verfügbarer Hardware-Plattform wird ein Trusted Platform Module (TPM) für eine Remote-Attestation der Plattform eingesetzt. Bietet die jeweilige Plattform keinen solchen Hardware-Vertrauensanker, so kann der Trusted Connector nichtsdestotrotz mit einem Software-basierten TPM verwendet werden. In diesem Fall kann sein Kommuni-

kationspartner das ggf. schwächere Sicherheitsniveau der Plattform im Rahmen der Remote Attestation feststellen und auf dieser Grundlage entscheiden, ob er Daten für diese Plattform freigibt. Zusammenfassend gilt:

- Kommunikation zwischen Konnektoren ist integer, authentisch und vertraulich.
- Konnektoren weisen sich gegenseitig ihren Sicherheitsstatus nach.
- Datenaustausch kann auf vertrauenswürdige sichere Konnektoren begrenzt werden.

¹Galen Hunt and George Letey and Edmund B. Nightingale. The Seven Properties of Highly Secure Devices, Microsoft Research NEXt Operating Systems Technologies Group, März 2017

Datensouveränität Unter dem Begriff „Datensouveränität“ wird verstanden, dass Datenanbieter bestimmen können, wer ihre Daten erhält, wie sie verarbeitet werden dürfen und an welchen Zweck und an welche Auflagen die Nutzung gebunden sein soll. Diese Entscheidung muss anhand von Richtlinien definiert werden können, die für den Benutzer verständlich und für Auditoren nachprüfbar sind. Sie müssen auf authentischen Informationen über die Identität und das Sicherheitsniveau des Consumer-Connectors basieren. Im Bezug auf die Datensouveränität zeichnet sich der Konnektor im Wesentlichen durch folgende Attribute aus:

- Die Bereitstellung von Daten kann abhängig vom Sicherheitsniveau des Datenkonsumenten erfolgen.
- Die Bereitstellung von Daten kann jedoch auch an Auflagen bzgl. ihrer Verwendung gebunden werden.
- Unzulässige Arten der Datenverarbeitungen und Datenflüsse können unterbunden werden.
- Die Einhaltung von zulässigen Datenflüssen ist nachweisbar und auditierbar.

Anwendungssicherheit Konnektoren dienen als Ausführungsplattform für Apps, durch die Daten innerhalb

des Konnektors verarbeitet und für andere Konnektoren bereitgestellt werden können. Die Herkunft und Integrität von Apps muss während der Installation geprüft werden, um Manipulationen von Apps oder das Einschleusen von Schadsoftware zu verhindern. Bei der Ausführung von Apps muss die Trusted-Connector-Plattform sicherstellen, dass sich Apps nicht gegenseitig beeinträchtigen, die Ausführungsplattform selbst manipulieren oder Daten unkontrolliert preisgeben. Letzteres erfordert, dass Apps zunächst nicht in der Lage sein dürfen, ausgehende Verbindungen zu initiieren, sondern dieses Recht entweder explizit erteilt werden muss oder sämtliche Kommunikation über einen vertrauenswürdigen Referenzmonitor („Core Platform“) erfolgt. Die Anwendungssicherheit des Trusted Connector umfasst damit die folgenden Kernaspekte:

- Die Authentizität und Integrität von Apps ist sichergestellt.
- Apps können selbstständig keine Daten preisgeben, jede Kommunikation (in/out) wird kontrolliert und protokolliert.
- Apps laufen in Konnektoren strikt voneinander isoliert.

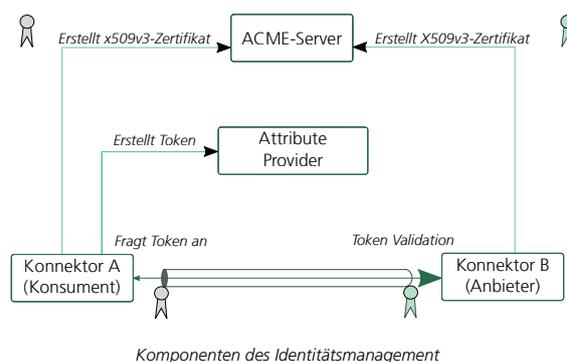
3 Identitäts- & Access-Management

Das IIoT stellt besondere Anforderungen an das Identitäts- und Access-Management (IAM), da im Gegensatz zu klassischen Enterprise-Architekturen keine zentrale Instanz mehr über Zugriffe entscheiden kann. Ziel des IAM, das durch den Trusted Connector implementiert wird, ist daher, dem jeweiligen Konnektor-Betreiber die Kontrolle über seine Daten zu geben und diese *Autorisierung* von der darunterliegenden *Authentisierung* und *Verschlüsselung* zu trennen. Authentisierung und Verschlüsselung sind notwendige Voraussetzung für eine sichere Kommunikation, die nicht durch Dritte abgehört oder modifiziert werden kann. Ein Zugriff auf Daten erfordert jedoch zusätzlich eine Autorisierung, die von verifizierten Identitätsattributen der Gegenstelle abhängt. Diese Attribute können unterschiedlich stark beglaubigt sein und von einer unbestätigten Selbstauskunft bis hin zu geprüften und zertifizierten Attributen reichen.

Identitäten und Attribute Eine Identität im Industrial Data Space bezeichnet einen Trusted Connector und seinen Betreiber. Sie besteht aus mehreren Komponenten, durch die eine zunehmend starke Identifizierung realisiert wird. Zunächst werden Konnektoren über ein *X509v3-Zertifikat* identifiziert, das an ihren Hostnamen gebunden ist. Für Konnektoren, die über das Internet erreichbar sind, können diese Zertifikate durch einen öffentlichen ACME-Dienst erstellt werden, für interne Konnektoren können unternehmensinterne ACME-Server oder selbst generierte und mit einer eigenen CA signierte Zertifikate verwendet werden. Auf dieser Stufe ist bereits eine vertrauliche und authentische Kommunikation zwischen Konnektoren möglich, allerdings sind noch keine weitergehenden Informationen über die Eigenschaften des Konnektors oder seines Betreibers verfügbar. Solche Informationen werden in Form von Identitätsattributen bereitgestellt, die durch einen Attribute Provider verwaltet werden. Mittels der Identitätsattribute werden Angaben zum Betreiber eines Konnektors, sowie zum Sicherheitsniveau des jeweiligen Konnektors in einer Form hinterlegt, die es Datenanbietern ermöglicht Zugriffskontrollrichtlinien auf Basis dieser Attribute festzulegen. So wird es möglich, nur Konnektoren eines bestimmten Betreibers Zugriff auf Daten zu erteilen, oder nur Konnektoren mit einem Mindestniveau an Sicherheit zuzulassen. Identitätsattribute des Attributeproviders sind von diesem beglaubigt. Nicht beglaubigte Identitätsattribute können vom Betreiber eines Konnektors selbst angegeben und werden von diesem in Form einer Selbstauskunft bereitgestellt. Ihre inhaltliche Richtigkeit ist also nicht sichergestellt und sie sind lediglich als eine ungeprüfte Beschreibung des Konnektors aus Sicht des (authentischen) Betreibers eines Konnektors zu verstehen. Im Gegensatz dazu werden bestätigte Identitätsattribute durch eine unabhängige Zertifizierungsstelle verifiziert. Hierzu definiert der Industrial Data Space Zertifizierungskriterien und einen Prüfprozess, an dessen Ende die Erteilung einer Zertifizierung und die Signatur der jeweiligen Identitätsattribute steht.

Auf diese Weise kann grundsätzlich jedermann die IDS-Infrastruktur verwenden, indem er einen Trusted Connector lediglich mit einem X509v3-Zertifikat betreibt, das bis auf die Richtigkeit des Hostnamens keine weiteren Zusä-

cherungen gibt. Andererseits können Betreiber von einer höheren Sicherheitsstufe ihrer Konnektoren profitieren, in dem sie Zugang zu höherwertigen Diensten erlangen, die ihre Daten nur vertrauenswürdigen und ggf. zertifizierten Konnektoren bereitstellen. Die Voraussetzung hierfür ist, dass Datenanbieter und -konsument den selben Attribute Provider verwenden und diesem vertrauen. Dabei ist es jedoch nicht erforderlich, dass für die gesamte IDS-Infrastruktur nur ein Attribute Provider existiert. Vielmehr können mehrere Attribute Provider Identitätsattribute verschiedener Kontexte verwalten und parallel verwendet werden. So ist es beispielsweise möglich, das Unternehmen in Konsortien und Projekten zusammenarbeiten und für den Zweck dieser Zusammenarbeit einen gemeinsamen Attribute Provider verwenden, bei dem sich alle Mitglieder des Konsortiums registrieren und fortan als solche ausgewiesen werden.



Technische Umsetzung Für das Identitäts- und Access-Management verwendet der Trusted Connector Standardprotokolle aus dem Web-Umfeld. Beim erstmaligen Initialisieren eines Trusted Connector wird ein Public-/Private-Schlüsselpaar, sowie ein Signing Request für den Hostnamen des Konnektors erzeugt und mittels ACME-Challenge verifiziert. Für öffentlich erreichbare Konnektoren empfiehlt sich hierfür ein öffentlicher Dienst, dessen CA in vielen Clients als vertrauenswürdig betrachtet wird. Für interne Konnektoren kann entweder ein eigener ACME-Server zum Einsatz kommen, oder es werden selbstsignierte Zertifikate im Trusted Connector erstellt

und manuell ausgetauscht.

Diese Zertifikate werden während der Verbindung zwischen Trusted Connectors über das IDS-Protokoll für den Aufbau der TLS-Verbindung benutzt – sowohl für die Client-Authentisierung, als auch für die Verschlüsselung. Ist die TLS-Verbindung etabliert, so werden im Rahmen des IDS-Protokolls JSON Web Tokens (JWT) für den Zugriff auf Ressourcen des Trusted Connectors etabliert. Hierzu stellt der Client (Datenkonsument) einen OAuth2.0-konformen Token Request an den Attribute

Provider und authentisiert sich dabei mittels TLS Client Credentials. Über einen OAuth 2.0 *Assertion Flow* erhält er ein JWT mit bestätigten oder unbestätigten Identitätsattributen, signiert vom Attribute Provider. Dieses sendet er an den Datenanbieter, der auf Basis der enthaltenen Attribute wiederum entscheiden kann, ob er den Zugriff gestattet oder ablehnt. Wurde die Verbindung auf diese Weise etabliert, können fortan Daten über die bestehende Sitzung ausgetauscht werden, ohne dass eine erneute Authentisierung erforderlich ist.

4 Der Trusted Connector als sichere Ausführungsplattform

Konnektoren sind die Edge-Gateways, über die interne Datenquellen in der IDS-Infrastruktur bereitgestellt und genutzt werden können. Sie sind das Kernelement der Sicherheitsarchitektur des IDS und realisieren sowohl die Protokolle für das Identitäts- & Access-Management und zur sicheren Datenübertragung, als auch eine vertrauenswürdige Ausführungsumgebung für *Apps* zur Datenvorverarbeitung und -Analyse.

Ein Trusted Connector verfügt über Sicherheitsmechanismen, mit denen die Integrität des Software-Stacks, die Vertraulichkeit und Integrität der Daten sowie die Isolation von *Apps* sichergestellt werden können. Zusammen ermöglichen diese Eigenschaften neue Anwendungsszenarien, die mit bisherigen Sicherheitsarchitekturen nicht realisiert werden können:

Höherwertige Datenangebote bei höherer Sicherheit Konnektoren können grundsätzlich in verschiedenen Sicherheitsstufen existieren – als einfaches Software-Programm auf einem herkömmlichen Rechner, bis hin zu sicheren integrierten Hard- und Softwarestacks auf eingebetteten Systemen. Das Sicherheitsniveau jedes Konnektors lässt sich mit Hilfe einer Remote-Attestation feststellen und analog zu den Identitätsattributen unterschiedlicher Stärke für die Entscheidung von Zugriffsanfragen verwenden. So können Betreiber eines Trusted Connector festlegen, dass sie ausschließlich mit Konnektoren mit einem nachweisbar integren Software-Stack und vertrauenswürdigen *Apps* kommunizieren möchten.

Datenverarbeitung an der Quelle In vielen Fällen werden Rohdaten von Sensoren für Analysezwecke benötigt. Im IIoT-Kontext sind diese Daten jedoch hochkritisch, da sich aus ihnen detaillierte Informationen über interne Produktionsabläufe gewinnen lassen. Eine Lösung ist es, die kritischen Daten innerhalb des Unternehmens zu belassen und stattdessen die Analysedienste in Form von *Apps* zu den Daten zu transportieren. Hierzu muss allerdings sichergestellt sein, dass *Apps* zuverlässig ausgeführt und nicht manipuliert werden. Des Weiteren muss bei der Ausführung fremder *Apps* durch den Daten-Provider garantiert werden, dass diese keinerlei Zugriff auf das Netzwerk, andere *Apps* oder den Trusted Connector selbst erhalten, sondern von anderen Prozessen isoliert bleiben und die zu verarbeitenden Daten lediglich über eine definierte Schnittstelle erhalten.

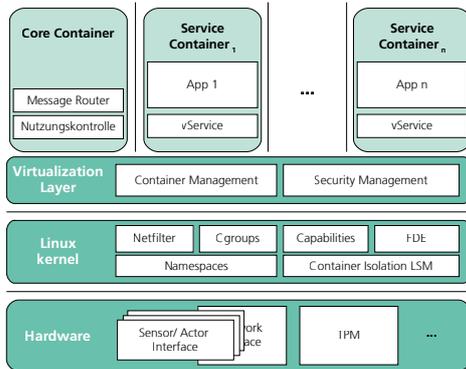
Übersicht Trusted Connector-Architektur Der Trusted Connector ist ein Software-Stack, der im wesentlichen aus den Komponenten Kernel, Container Management Layer (CML) und Core Container besteht. Beim Kernel handelt es sich um einen Linux Kernel, der den *Apps* eine POSIX-kompatible Laufzeitumgebung bereit stellt

und zugleich alle Kommunikation kontrolliert. Dies erfolgt insbesondere mit Linux-Namespaces, Control Groups, Capabilities und einem Linux Security Module (LSM). Optional können zudem auch die KVM-Kernel-Module verwendet werden.

Oberhalb des Kernels befindet sich das Container Management Layer (CML), das den Lebenszyklus der Container, die Verifikation von Container-Images, sowie das Nachladen von Containern aus dem App-Store übernimmt. Der Trusted Connector unterstützt zwei CML-Implementierungen: Docker und trust-me. Die Vorteile des Docker-Ökosystems sind seine weite Verbreitung, die Unterstützung verschiedenster Plattformen – angefangen bei eingebetteten Systemen wie dem Raspberry Pi bis hin zu skalierenden Cloud- und Cluster-Plattformen wie Amazon AWS/ECS und Kubernetes. Diese Mächtigkeit kann jedoch auch von Nachteil sein, wenn dedizierte eingebettete Geräte für sicherheitskritische Anwendungen benötigt werden. Hier kommt das trust-me CML zum Zug, dessen Vorteile im Fokus auf starke Container-Isolation sowie nativer Unterstützung für Sicherheitsmechanismen wie Secure Boot, eine TPM-gestützte Full Disk Encryption (FDE) und in einer netfilter-Separierung von Containern bestehen.

Container beinhalten *Apps*, die Funktionalität zur Verarbeitung und Analyse von Daten bereitstellen können. *Apps* sind grundsätzlich isoliert und haben keinen Zugriff auf Speicher oder Dateisystem anderer *Apps* oder den CML. Auch wird ihnen kein Netzwerkinterface zugeteilt, über das sie mit dem externen Netz oder anderen *Apps* kommunizieren könnten. Ihre Berechtigungen können weiter durch Kernel-Capabilities, sowie durch das Linux Security Module kontrolliert werden. Die Zuteilung von Systemressourcen wie CPU und Speicher lässt sich ebenfalls Container-spezifisch festlegen. In diesem Zustand sind *Apps* zwar vor dem Zugriff aufeinander und auf das darunterliegende System geschützt, aber wenig nutzbringend. Um sie nutzen zu können, müssen sie mit Daten versorgt werden und ihre Ergebnisse abrufbar sein können. Dies geschieht durch einen besonderen, privilegierten Container – die sogenannte *Core Platform*. Die Core Platform ist der einzige Container, der ein Netzwerkinterface mit externem Zugriff erhält und mit jedem einzelnen App-Container über eine Netzwerk-Bridge kommunizieren kann. Somit muss jede Kommunikation innerhalb eines Trusted Connector über die Core Plat-

form laufen. Innerhalb der Core Platform befinden sich Mechanismen zur Datenflusskontrolle, das IDS-Protokoll, über das Verbindungen mit externen Trusted Connectors aufgebaut werden können, sowie die Management-Schnittstellen, über die die Einstellungen des CML verwaltet werden können.



Komponenten des Trusted Connector-Stack

Integrität der Software durch Remote Attestation

Die Integrität des Software-Stacks eines Trusted Connector wird durch Hardwarevertrauensanker in Form eines Trusted Platform Module (TPM) realisiert. Ein TPM ist ein dediziertes vertrauenswürdige Hard- oder Softwaremodul, das eine sichere Verwaltung kryptografischer Schlüssel, Verschlüsselungs- und Signaturoperationen, sowie einen sicheren Speicher bereitstellt. Mittels eines von der Trusted Computing Group standardisierten *Secure Boot*-Prozesses verifiziert der Trusted Connector beim Start des Systems die Integrität aller Betriebssystemkomponenten und hinterlegt ihre Hashwerte in den sog. PCR-Registern. Konnektoren verwenden diese Werte während des Verbindungsaufbaus, um sich gegenseitig im Rahmen des IDS-Protokolls mittels einer Remote-Attestation die Integrität ihres Software-Stacks nachzuweisen. Die Remote-Attestation unterstützt hierbei drei Sicherheitslevel: Bei Level 0 wird de facto keine Attestierung durchgeführt – die Konnektoren tauschen lediglich den Hinweis aus, dass sie über kein TPM oder keinen Secure-Boot-Prozess verfü-

gen. Level 1 umfasst einen Integritätsnachweis von Boot-Firmware, Bootloader, Kernel und Core Platform. Dies sind damit die unveränderlichen Bestandteile des Trusted Connector, die nicht modifiziert werden können, ohne die PCR-Hashes zu verändern. Da natürlich Software-Updates dieser Komponenten nach wie vor möglich sein müssen, werden TPM 2.0 custom policies verwendet, um die Entscheidung über die Korrektheit eines PCR-Wertes an eine externe *Software Authority* zu delegieren.

Eine Remote-Attestation auf Level 2 umfasst zusätzlich zu den Komponenten des Level 1 auch die Messung der installierten Apps. Hierzu werden die Container-Images der Apps zusammen mit ihren Meta-Daten, d.h. der jeweiligen App-Beschreibung geprüft und die Integrität der dabei entstehenden PCR-Werte zusammen mit dem *measurement log* wiederum durch die Software Authority bestätigt.

Core Platform Sämtliche Kommunikation zwischen Apps und zwischen Trusted Connectors erfolgt über die Core Platform. Diese dient daher als zentraler Punkt für das Erstellen von Audit-Logs und zur Kontrolle von Datenflüssen zwischen Apps. Der Vorteil hierbei ist, dass Apps nicht vertrauenswürdig sein müssen und nicht von IDS-spezifischen Schnittstellen abhängen. Anstatt Apps spezifisch für den IDS zu entwickeln, können Konnektor-Betreiber so existierende Apps (z.B. Docker-Container) in den Trusted Connector laden und in ihre Datenfluss-Konfiguration einbinden. So lange die App eines der Protokolle verwendet, die vom Message Router der Core-Plattform unterstützt werden, kann sie in eine Datenverarbeitungskette in Form einer *Message-Route* eingebunden werden. Message-Routes orchestrieren Nachrichten zwischen einzelnen Apps, konvertieren sie in die erforderlichen Formate und stellen sie schließlich über das IDS-Protokoll anderen Konnektoren zur Verfügung, wobei die Core Platform jeden einzelnen Verarbeitungsschritt im Rahmen der Datenflusskontrolle prüft. Neben der zentralen Kommunikationsschnittstelle beinhaltet die Core-Plattform auch die Schnittstellen zum Management des Trusted Connectors. Betreiber konfigurieren ihren Konnektor entweder über ein Webinterface oder über eine textbasierte Konsole.

5 Datennutzungskontrolle mit dem Trusted Connector

Souveränität über Daten zu wahren, ist das oberste Ziel des Industrial Data Space und zwingende Voraussetzung für Anwendungsfälle, die über das reine Teilen von ohnehin öffentlichen Daten hinausgehen. Mit dem Trusted Connector als vertrauenswürdigen Hardware-/Software-Stack verfügen die IDS-Teilnehmer über einen Endpunkt, über den sich fortgeschrittene Techniken der Datennutzungskontrolle umsetzen lassen. Datennutzungskontrolle unterscheidet sich von herkömmlicher Zugriffskontrolle dadurch, dass nicht der Zugriff auf eine Ressource (z.B. einen Dienst) zu einem Zeitpunkt kontrolliert wird, sondern die Nutzung der Daten über die Zeit hinweg. Dies ist erforderlich, um typische Anforderung an die Kontrolle der Datennutzung zu realisieren, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Beispiel: Einhaltung von Datenschutzerfordern-gen Bei der Verarbeitung persönlicher Daten müssen Konnektor-Betreiber jederzeit Auskunft über den Verbleib dieser Daten geben können, sie auf Anfrage des Eigentümers löschen und sicherstellen, dass die Verarbeitung ausschließlich dem angegebenen Zweck folgt. Was schon Betreiber herkömmlicher Anwendungen mit zentralen Datenbanken vor Herausforderungen stellt, wird für Datenanbieter im Industrial Internet of Things zur Mammutaufgabe. Die Herkunft jedes einzelnen Datums muss nachverfolgbar sein und während der Verarbeitung muss beurteilt werden können, in welchem Verarbeitungsschritt Daten als personenbezogen gelten.

Beispiel: Nutzungsrestriktionen für bereitgestellte Daten In dem Moment, in dem Daten von einem Dienst abgerufen werden, verliert dieser typischerweise die Kontrolle über sie. Für viele IIoT-Anwendungen ist es jedoch erforderlich, dass auch sensible Daten ausgetauscht und mit Nutzungsrestriktionen versehen werden können. Solche Nutzungsrestriktionen umfassen beispielsweise die Auflage, die Daten nach einer bestimmten Zeit zu löschen, eine Einschränkung des Einsatzzwecks oder die Forderung, Daten nicht weiterzuleiten.

Datenflusskontrolle mit LUCON Der Trusted Connector verwendet standardmäßig das LUCON Policy-Framework zur Kontrolle von Datenflüssen zwischen Apps und Konnektoren. LUCON markiert Daten mit *Labels*, sobald sie den Trusted Connector erreichen. Im weiteren Verlauf der Datenverarbeitung in einer Message-Route werden Labels über Apps hinweg transportiert und durch diese ggf. erweitert, modifiziert, oder entfernt. Abhängig von den Labels, die an einer Nachricht haften, können mit LUCON Einschränkungen und Auflagen – sogenannte *Obligations* – verbunden werden. So kann beispielsweise verhindert werden, dass als *privat* markierte Daten an externe Dienste versendet werden oder zunächst einen Anonymisierungsdienst durchlaufen müssen. Durch Obligations können Aktionen auf dem Trusted Connector ausgeführt werden oder zusätzliche Auflagen in Form von *sticky policies* mit den Daten verknüpft werden. Aktionen auf dem Trusted Connector umfassen beispielsweise das Logging von Nachrichten

für Audit-Zwecke oder das Löschen von Daten aus einem Dienst. Sticky Policies sind Richtlinien, die zusammen mit den Daten im Rahmen des IDS-Protokolls an den Trusted Connector der Gegenstelle übermittelt werden. Dies können einerseits wiederum LUCON-Policies sein, mit denen die Gegenstelle die Datenflussanforderungen des Datenanbieters umsetzen wird, oder aber Nutzungsrestriktionen in Form von ODRL. Die Open Digital Rights Language (ODRL) ist ein Standard zur Spezifikation von Nutzungseinschränkungen für Daten und kann beispielsweise dazu verwendet werden, die Nutzungsdauer, -häufigkeit oder die Art der zulässigen Operationen auf Daten zu definieren. Im Gegensatz zu LUCON-Policies können ODRL-Anforderungen jedoch nicht automatisch durchgesetzt werden, sondern dienen als nachweisbare Vereinbarung zwischen Konnektor-Betreibern.

Auditierbare Datenverarbeitung Neben der aktiven Durchsetzung von Datenflussanforderungen lässt sich mit LUCON auch überprüfen und ggf. nachweisen, dass die Datenverarbeitung im Trusted Connector die Anforderungen einhält. Betreiber können so auf einen Blick erkennen, ob die konfigurierten Message-Routen jederzeit ihren Anforderungen entsprechen, oder ob sie unter bestimmten Konstellationen unzulässige Datenflüsse bewirken könnten (die wiederum zur Laufzeit blockiert würden). Hierzu verwendet LUCON intern eine formale Repräsentation von Message-Routen und Richtlinien und prüft mittels Model-Checking mögliche Verletzungen der Richtlinien durch die Route.

Route data	Visualization
Uptime 4 minutes Context camel-1 Status Started	<pre> graph LR A[idsserver://0.0.0.0:9292/zero] --> B[Log Definition] </pre>
Data Flow Validity Invalid This route violates usage control policies	
<pre> Service allLogServices may receive messages, which is forbidden by rule "dropLog". input1 receives message without labels log1 receives message labelled public </pre>	

Warnung bei Message-Routen, die Nutzungsrestriktionen verletzen

Technische Umsetzung Der Trusted Connector verwendet Apache Camel als Message-Router – eine quelloffene Lösung zur Realisierung von Enterprise Integration Patterns, die in vielen großvolumigen Produktiv-Anwendungen erprobt wurde. Für die Erstellung von LUCON-Policies existiert ein Xtext¹-basierter Editor für die Eclipse-Plattform, der den Entwickler mit Auto-Vervollständigung und Syntax-Highlighting unterstützt und Policies automatisch kompiliert. Die kompilierten Policies werden anschließend über die Administrations-schnittstelle in den Trusted Connector geladen und dort ohne weiteres Zutun des Benutzers zur Verifikation der Camel-Routen, sowie zur Durchsetzung der Richtlinien verwendet.

```

flow_rule {
  id oemSupplierData
  description "The OEM can only use supplier data for risk or bottleneck management,
  but not for purchasing or sales purposes"
  when {
    endpoint "http://example.com/SpecificOperationOfADDataService"
  }
  receives {
    purpose(riskManagement) or purpose(bottleneckManagement)
    and not(
      purpose(sales) or purpose(purchase)
    )
  }
  decide allow
}

```

LUCON Datenfluss-Richtlinie in Eclipse-Editor

Obligations können in die Core Plattform geladen werden und stehen dann für die Durchsetzung von Richtlinien zur

Verfügung. So wird bspw. die Anforderung von ODRL-Nutzungsrestriktionen in Form einer Obligation realisiert, die ODRL-Daten an die jeweilige Nachricht bindet und an den Trusted Connector der Gegenstelle übermittelt.

```

<http://example.com/policy:1111> a odrl:Offer ;
  odrl:permission {
    odrl:action odrl:use ;
    odrl:target
      ↪ <http://example.com/SpecificOperationOfADDataService> ;
    odrl:assigner <http://example.com/Supplier> ;
    odrl:assignee <http://example.com/OEM> ;
    odrl:constraint {
      odrl:purpose ids:RiskManagement;
      odrl:purpose ids:BottleneckManagement;
    }
  };
  odrl:prohibition {
    odrl:action odrl:use ;
    odrl:target
      ↪ <http://example.com/SpecificOperationOfADDataService> ;
    odrl:assigner <http://example.com/Supplier> ;
    odrl:assignee <http://example.com/OEM> ;
    odrl:constraint {
      odrl:purpose ids:Purchasing;
      odrl:purpose ids:Sales;
    }
  };
}

```

ODRL-Nutzungsrestriktion

Die Kombination aus nachweisbarer Vertrauenswürdigkeit der Trusted Connector-Plattform und Datennutzungskontrolle erlaubt es Betreibern, auch sensible Daten anzubieten und dabei ihren rechtlichen Anforderungen technisch nachweisbar nachzukommen.

¹ <https://www.eclipse.org/Xtext/>

Kontakt

Ansprechpartner

Dr. Julian Schütte
Gerd Brost

Fraunhofer AISEC
Parkring 4, 85748 Garching bei München

☎ +49 (0) 89 3229986-292
✉ info@aisec.fraunhofer.de

Autoren

Dr. Julian Schütte
Service & Application Security

Gerd Brost
Service & Application Security

Sascha Wessel
Secure Operating Systems

Open-Source-Projekt

GitHub <https://github.com/industrial-data-space>

Förderrahmen

Der Trusted Connector ist eine Komponente des Industrial Data Space, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projektes InDaSpacePlus (Förderkennzeichen 01|S17031). Anwendungen des Trusted Connector werden im Rahmen der Aktivitäten des Forschungsclusters Cognitive Internet Technologies CIT gefördert.