

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

**Sicherer Verbindungsaufbau für nicht
netzwerkfähige Feldgeräte auf Basis von
Zertifikaten**

Masterthesis (M. Sc.)

von
Kilian Nikolaus Rupp

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Sicherer Verbindungsaufbau für nicht netzwerkfähige Feldgeräte auf Basis von Zertifikaten

Masterthesis (M. Sc.)

von
Kilian Nikolaus Rupp
geb. am 06.01.1998
in Saarlouis
Matr.-Nr.: 67723

Betreuer der Firma Hager Group
M. Sc. Nils Schlegelmilch

Betreuer der Hochschule Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Philipp Nenninger
Prof. Dr.-Ing. Reiner Kriesten

Karlsruhe, 01.10.2025 bis 31.03.2026

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Security und konzeptionelle Grundlagen von Feldgeräten	7
2.1	Einordnung von Feldgeräten in industrielle Systeme und Anlagen	7
2.2	Zentrale Schutzziele für Feldgeräte und industrielle Kommunikation	10
2.3	Stand der Technik bei nicht netzwerkfähigen Feldgeräten	10
2.4	Public-Key-Infrastrukturen und Zertifikate	14
2.5	Regulatorische Anforderungen an Feldgeräte	14
3	Bedrohungsmodell	15
	Literaturverzeichnis	17

1 Einleitung

2 Security und konzeptionelle Grundlagen von Feldgeräten

2.1 Einordnung von Feldgeräten in industrielle Systeme und Anlagen

Einleitung
Kapitel
schreiben

2.1.1 Funktion und Aufgaben von Feldgeräten

Feldgeräte nehmen eine zentrale Rolle in industriellen Automatisierungs- und Steuerungssystemen ein. Sie bilden die Schnittstelle zwischen der physischen Welt und übergeordneten Steuerungssystemen, indem sie Daten erfassen, verarbeiten und weiterleiten oder direkt in Prozesse eingreifen. Zu den typischen Feldgeräten gehören Sensoren, die physikalische Größen wie Temperatur, Druck, Füllstand oder Durchfluss messen, sowie Aktoren, die mechanische Bewegungen oder andere Aktionen ausführen. Im Fokus dieser Thesis stehen Sensoren, während Aktoren nicht Gegenstand der Untersuchung sind.

Die Einsatzgebiete von Feldgeräten sind äußerst vielfältig und erstrecken sich über nahezu alle Industriezweige. In der Prozessindustrie, beispielsweise in der Chemie- oder Öl- und Gasindustrie, überwachen sie kritische Parameter, um die Sicherheit und Effizienz von Anlagen sicherzustellen. In der Fertigungsindustrie ermöglichen Feldgeräte eine präzise Erfassung von Zuständen und Prozessgrößen und bilden die Grundlage für automatisierte Produktionsabläufe. Auch in der Energieversorgung, etwa in Kraftwerken, Stromnetzen oder der Wasserwirtschaft, sind Feldgeräte unverzichtbar für die Überwachung und Steuerung technischer Anlagen.

Feldgeräte unterscheiden sich zudem hinsichtlich ihrer Interaktion mit Menschen und Maschinen. Während einige Geräte über lokale Anzeige- und Bedienelemente verfügen und eine direkte Bedienung vor Ort erlauben, werden andere Feldgeräte ausschließlich maschinell über Steuerungen, Asset-Management-Systeme oder mobile Servicegeräte angesprochen.

Da Feldgeräte den realen physikalischen Zustand eines Prozesses erfassen und Prozessentscheidungen auf diesen Messwerten basieren, ist ihre zuverlässige und korrekte Funktion von entscheidender Bedeutung. Fehlerhafte oder manipulierte Messwerte können unmittelbare Auswirkungen auf die Verfügbarkeit, Produktqualität und Sicherheit industrieller Systeme haben.

Eine
Statistik
wie viele
Feldgeräte
es
weltweit
gibt ->
VEGA?

2.1.2 Systemarchitekturen und Einbindung von Feldgeräten

Zur Einordnung von Funktionen, Systemen und Kommunikationsbeziehungen in industriellen Umgebungen wird häufig das Purdue-Modell (auch als Purdue Enterprise Reference Architecture, PERA, referenziert) verwendet. Es beschreibt ein hierarchisches Ebenenkonzept für industrielle Produktions- bzw. Prozesssysteme und strukturiert die Aufgabenverteilung von

der operativen Prozessausführung bis zur unternehmensweiten Planung. Dabei wird zwischen horizontaler Kommunikation (innerhalb einer Ebene) und vertikaler Kommunikation (zwischen unterschiedlichen Ebenen) unterschieden. Für die Ebenen 0 bis 4 ist das Modell weitgehend kompatibel mit dem in der Praxis verbreiteten fünfstufigen Ebenenkonzept der Automatisierungspyramide, im Purdue-Ansatz werden jedoch zusätzlich Zonen zur Abgrenzung und Kopplung unterschiedlicher Domänen berücksichtigt, insbesondere eine Übergangszone (Level 3.5, OT-DMZ) sowie eine externe bzw. Internet-nahe Zone [1]. Damit rückt weniger die reine funktionale Hierarchie als vielmehr die Netzsegmentierung und die kontrollierte Gestaltung von Übergängen in den Vordergrund, um Kommunikationsflüsse zwischen Office-IT, OT/ICS und externen Netzen gezielt zu steuern und abzusichern [2].

In ►Bild 2.1 ist das Purdue-Modell als hierarchische Referenzarchitektur für industrielle OT/ICS-Umgebungen dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht die Anordnung der Ebenen sowie deren typische Kopplungspunkte und Schnittstellen. Darüber hinaus sind beispielhafte Kommunikationspfade zwischen den Ebenen eingezeichnet, wodurch sowohl horizontale Informationsflüsse innerhalb einer Ebene als auch vertikale Informationsflüsse zwischen den Ebenen nachvollziehbar werden. Ergänzend zeigt die Darstellung den Einsatz von Sicherheitskomponenten wie Firewalls und unidirektionalen Übertragungseinrichtungen (Datendiode), mit denen Kommunikationsbeziehungen segmentiert und Datenflüsse gezielt auf eine Richtung beschränkt werden können.

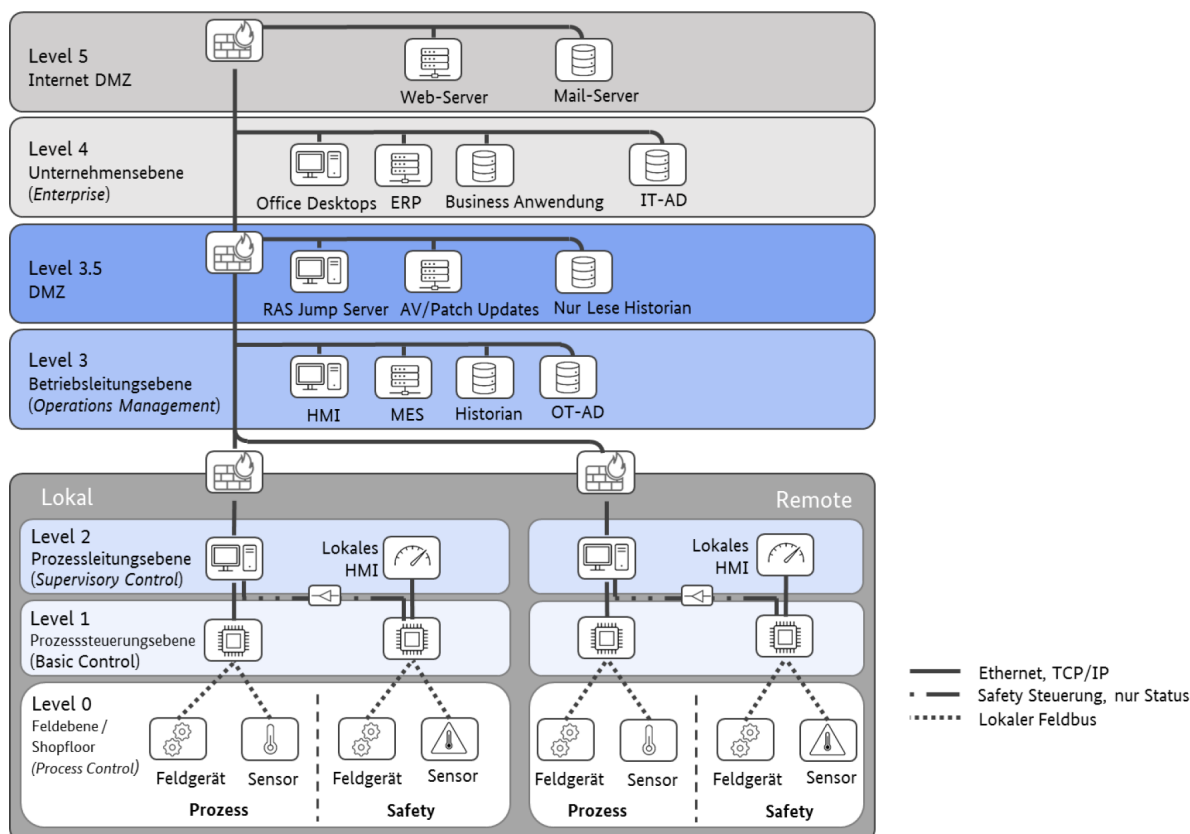


Bild 2.1. Beispiel Netzwerk nach Purdue/IEC 62443 Bildquelle: [3]

Das Purdue-Modell ergänzt oberhalb der Produktionsführungs- und Unternehmensebene noch

eine Internet Ebene, Ebene 5, welche die typische Kommunikation mit dem Internet (Web, Mail) repräsentiert.

Auf Ebene 4 (Unternehmensebene) findet typischerweise unter Nutzung eines ERP-Systems die übergeordnete Planung und Koordination betriebswirtschaftlicher Abläufe statt. Dazu zählen insbesondere die Grobplanung der Produktion sowie unterstützende Funktionen für Organisationsbereiche wie Vertrieb (z. B. Erfassung von Kundenaufträgen) und Einkauf (z. B. Beschaffung von Materialien), welche in einem ERP-System abgebildet werden können [1].

Eine weitere, wichtige Erweiterung ist die Übergangszone Ebene 3.5 (OT-DMZ) zwischen der Office-IT und der Produktion. Als Demilitarized Zone verhindert diese Zone eine direkte Kommunikation zwischen den beiden Segmenten. Informationen werden ausschließlich über in der DMZ bereitgestellte Schnittstellen ausgetauscht. Idealerweise wird die Verbindung hierbei von der Zone mit dem höheren Schutzbedarf (das ICS) aus aufgebaut. So dürfen zum Beispiel ICS-Systeme Daten auf eine Datenbank in der DMZ schreiben, die Office Systeme hier aber nur lesend zugreifen.

Auf Ebene 3 (Betriebsleitungsebene) erfolgt eine detailliertere Planung und Steuerung der Produktion. Hier kommen häufig Manufacturing Execution Systems (MES) an den jeweiligen Produktionsstandorten zum Einsatz. Ein MES-System überwacht, steuert und optimiert in Echtzeit alle produktionsnahen Prozesse, einschließlich Betriebs-, Maschinen- und Personaldatenerfassung, sowie Material-, Qualitäts- und Energiemanagement, um eine effiziente Fertigung sicherzustellen [1]. Diese Ebene bildet die Schnittstelle zwischen der betriebswirtschaftlich orientierten Organisationsebene und den operativen Produktions- und Automatisierungssystemen.

Die Überwachung und operative Prozessführung erfolgt auf Ebene 2 (Prozessleitungsebene). Auf dieser Ebene werden typischerweise Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-Systeme sowie Prozessleitsysteme (PLS) zur Produktionsdatenerfassung, -visualisierung und -kontrolle eingesetzt. Sie unterstützen unter anderem die Anzeige und Auswertung von Betriebsdaten sowie die Überwachung von Anlagenzuständen und Prozessparametern.[1].

Auf Ebene 1 (Prozesssteuerungsebene) übernehmen speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS; engl. PLC) und zugehörige Ein-/Ausgabekomponenten (I/O) die lokale Steuerung und Regelung. Über diese Komponenten werden Signale aus der Feldebene verarbeitet und Stellgrößen an den Prozess ausgegeben. Die Steuerungsebene wirkt damit unmittelbar auf den Prozess ein.

In der Feldebene (Ebene 0) befinden sich die Komponenten, die Informationen aus dem materiellen Produktions- bzw. Prozessgeschehen erfassen oder als Aktoren direkt darauf einwirken. Dazu zählen beispielsweise Endschalter und Sensoren, die im Folgenden als Feldgeräte zusammengefasst werden. Diese Komponenten interagieren einerseits direkt mit dem physikalischen Prozess und andererseits, über eine zugehörige Infrastruktur (z. B. Anschluss- und Kopplungskomponenten), mit den informationsverarbeitenden Einheiten der darüberliegenden Ebenen. Für die Kommunikation auf Ebene 0 besteht grundsätzlich die Notwendigkeit, Sensordaten und Aktorbefehle unter deterministischen bzw. echtzeitnahen Bedingungen zu übertragen. Zusätzlich müssen bei Bedarf Diagnose- und Konfigurationsdaten übermittelt werden, etwa für Inbetriebnahme, Wartung oder Parametrierung [2].

Die horizontale und vertikale Kommunikation wird in der Praxis häufig über Feldbus- und Automatisierungsnetzwerke realisiert, die je nach Systemarchitektur und Generation sowohl ethernetbasiert als auch nicht ethernetbasiert ausgeprägt sein können.

Die Kommunikation in ICS ist nicht auf die jeweilige Ebene beschränkt. So kann der Wert eines Positionsgebers eines Ventils auf Ebene 0 über eine SPS auf Ebene 1 an eine Software auf Ebene 2 übertragen werden. Für die ebenenübergreifende Kommunikation kommen häufig Gateways zum Einsatz. Das Gateway (Ebene 1) wandelt Daten des I/O-Subsystems auf dem Feldbus (Ebene 0) in ein anderes Protokoll um und leitet diese an ein System auf Ebene 2 weiter. Von dort wird die Kommunikation zu Ebene 3 und 4 jeweils durch eine Firewall gefiltert und über die DMZ, die als Sicherheitszone eine direkte Kommunikation zwischen Netzwerken verhindert, geleitet. So können Daten zwischen "beliebigen" Systemen ausgetauscht werden, aber nicht jedes System muss mit jedem direkt kommunizieren. Das ERP-System benötigt zum Beispiel keine Sensordaten von I/O Systemen auf dem Feldbus [2].

Absatz
unter-
schied
ethernet
basiert
und nicht

In bestimmten Industriebereichen, insbesondere in der Prozessindustrie, sind zudem weiterhin zahlreiche Feldgeräte im Einsatz, die Messwerte über eine 4–20 mA Stromschleife analog liefern. Häufig wird dies durch eine zusätzliche digitale Kommunikation ergänzt, über die Konfigurations- oder Diagnosedaten übertragen werden können (z. B. über HART) [4].

Drahtlose Kommunikation kann ebenfalls Bestandteil horizontaler und vertikaler Kommunikationsstrukturen sein. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch auf kabelgebundenen Kommunikationspfaden liegt, wird drahtlose Kommunikation im weiteren Verlauf nicht vertieft.

Die in der Vergangenheit übliche physische Trennung der OT von anderen IT-Systemen und Datennetzen in Büroanwendungen ist heute aufgrund zunehmender Integrationsanforderungen nur in Ausnahmefällen bei erhöhtem Schutzbedarf anwendbar. Mehrstufige Produktionsschritte und deren übergreifende Steuerung sowie regulatorische Anforderungen machen es zunehmend notwendig, die OT auch über Organisationsgrenzen hinweg zu öffnen. Diese Entwicklung wird durch den Trend zur Optimierung von Fertigungsprozessen noch beschleunigt, vor allem im Rahmen der Industrie 4.0.[2].

2.1.3 Security-Relevante Bedeutung von Feldgeräten

2.1.4 Bedrohungen für Feldgeräte

2.2 Zentrale Schutzziele für Feldgeräte und industrielle Kommunikation

2.3 Stand der Technik bei nicht netzwerkfähigen Feldgeräten

Beschreibung
des Kapi-
tels
einfügen

2.3.1 Einordnung und Begriffsdefinition

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter nicht-netzwerkfähigen Geräten solche Feldgeräte verstanden, die entweder ausschließlich einen kontinuierlichen Messwert bereitstellen oder zwar

mit einer Steuerungs- oder Leitebene kommunizieren, selbst jedoch keinen eigenen Netzwerk- oder IP-Stack implementieren.

Typische Vertreter dieser Gerätekategorie sind klassische Prozessfeldgeräte wie Druck-, Temperatur-, Durchfluss- oder Füllstandssensoren sowie Grenz- und Näherungsschalter. Sie sind üblicherweise über 4-20-mA-Stromschleifen, über HART oder über feldbusbasierte Systeme wie PROFIBUS-PA oder vergleichbare Feldbusse an eine übergeordnete Steuerung angebunden. In der Automatisierungspyramide sind diese Geräte der Feldebene (Level 0) zuzuordnen, wie in Abbildung dargestellt.

Sie erfassen physikalische Größen direkt im Prozess oder wirken unmittelbar auf diesen ein und bilden damit die Schnittstelle zwischen physikalischer Anlage und digitaler Steuerung.

Zu den nicht-netzwerkfähigen Geräten im Sinne dieser Arbeit zählen ebenfalls Feldgeräte, die keine direkte Verbindung zu einer übergeordneten Steuerung besitzen, sondern deren Messwerte ausschließlich lokal bereitgestellt werden, beispielsweise über ein angeschlossenes Anzeige- oder Bediengerät. In solchen Fällen wird der Messwert ausschließlich von einem Menschen abgelesen, ohne dass das Feldgerät selbst Teil eines automatisierten Kommunikationssystems ist.

Feldgeräte, die über Feldbusse kommunizieren, sind damit zwar grundsätzlich kommunikationsfähig, jedoch nicht im Sinne eines autonomen Netzwerkteilnehmers. Die Kommunikation erfolgt typischerweise entweder über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (z. B. klassische 4-20-mA-Schleifen) oder über Feldbusse, bei denen mehrere Feldgeräte gemeinsam an einem Bussegment betrieben werden. Solche Segmente sind elektrisch und logisch klar abgegrenzt und werden über definierte Kopplungspunkte, etwa Ein-/Ausgangskarten oder Gateway-Module, an die darüberliegenden Steuerungs- oder Leitebenen angebunden.

Aus Sicht des einzelnen Feldgeräts bleibt die Kommunikationsschnittstelle dabei stets auf ein analoges Signal (4-20 mA) und/oder ein nicht-IP-basiertes Feldprotokoll beschränkt. Die Anbindung in IP-basierte Automatisierungs- oder IT-Netze erfolgt ausschließlich indirekt über die vorgelagerte Infrastruktur. Genau diese strukturelle Eigenschaft unterscheidet nicht-netzwerkfähige Feldgeräte grundlegend von modernen IoT- oder IIoT-Geräten und bildet die Ausgangsbasis für die Betrachtung sicherer Kommunikation und sicheren Onboardings in dieser Arbeit.

2.3.2 Kommunikation bei nicht netzwerkfähigen Feldgeräten

Nicht netzwerkfähige Feldgeräte kommunizieren in der Praxis über vergleichsweise einfache, feldnahe Übertragungsmechanismen, die historisch auf Robustheit, deterministisches Verhalten und lange Lebensdauern ausgelegt sind. Im Unterschied zu IP-basierten Endgeräten treten sie nicht als eigenständige Netzwerkteilnehmer auf, sondern sind aus Sicht der höheren Ebenen typischerweise über Kopplungskomponenten (z. B. Ein-/Ausgangskarten, Remote-I/O oder Gateways) angebunden.

2.3.3 Onboarding und Geräteidentität

Im Folgenden wird beschrieben, wie nicht netzwerkfähige Feldgeräte heute in Anlagen aufgenommen (Onboarding) und im Betrieb eindeutig zugeordnet werden.

Abschnitt
einfü-
gen was
Netzwerk-
Stack ist

insert ref

Was
ist die
AUtoma-
tisierungs-
py-
mide

Was
noch?

In der Praxis beginnt das Onboarding eines Feldgeräts meist mit der Zuordnung zwischen dem physischen Gerät und einer Messstelle bzw. einem Anlagentag. Dazu werden typischerweise Typenschildinformationen (Hersteller, Typbezeichnung, Seriennummer) mit den Planungsunterlagen abgeglichen. Diese Informationen werden dann im Asset Management System abgelegt. Dort wird die physische Messstelle (z. B. Tag-Nummer) manuell mit Geräteinformationen verknüpft. Dadurch können die Feldgeräte in Zukunft lokalisiert und identifiziert werden, sowie das Austauschen von Geräten, bzw. das Aktualisieren von Geräten (z. B. neue Firmware) koordiniert werden. [6]. Diese Informationen, die eine Identifikation unterstützen sollen, sind dabei aber nicht kryptografisch gesichert, sondern dienen lediglich der Identifikation und Sicherstellung, dass das Gerät äußerlich dem entspricht, das man erwartet.

Da die Identität nicht netzwerkfähiger Feldgeräte hauptsächlich organisatorisch, und nicht kryptografisch, abgesichert ist, muss auch organisatorisch sichergestellt werden, dass es keinen unbefugten Zutritt zur Anlage bzw. zum Gerät gibt. Wenn kryptografisch nicht sichergestellt werden kann, ob ein Gerät evt. unautorisiert getauscht bzw. manipuliert wurde, muss es organisatorisch sichergestellt werden. Dafür werden physische Schutzmaßnahmen angewendet. Zutrittskontrollen (Wer darf an die Anlage, Schaltschränke, Klemmenkästen), Zäune, verschlossene Technikräume oder Schränke. NIST SP 800-82 nennt physische und organisatorische Kontrollen als integralen Bestandteil eines OT-Sicherheitsprogramms, u. a. weil viele Angriffe und Fehlhandlungen in OT erst durch physischen Zugriff möglich werden [6]. In der Praxis wird damit ein erheblicher Teil der Verantwortung für die Sicherstellung der Geräteintegrität und -identität auf Betreiberprozesse und physische Zugriffskontrolle verlagert.

Die beschriebenen Verfahren sind in der industriellen Praxis etabliert, haben jedoch systematische Grenzen. Insbesondere liefern Nameplate/Seriennummer, Dokumentationsabgleich und konfigurierbare Kennzeichen (z. B. Tag-Felder) keinen kryptografischen Beweis dafür, dass die Kommunikationsbeziehung tatsächlich mit dem erwarteten physischen Gerät endet. Konfigurierbare Identifikationsattribute können prinzipiell geändert oder nachgeahmt werden.

Zudem adressieren rein physische Schutzmaßnahmen Insider-Bedrohungen nur begrenzt: Personen mit berechtigtem Zugang können Geräte tauschen, manipulieren oder Parameter verändern, ohne dass dies zwangsläufig erkannt wird. OT-Sicherheitsleitfäden behandeln solche Risiken unter anderem durch Forderungen nach kontrollierten Änderungen, Protokollierung und klaren Rollen/Prozessen, weisen aber zugleich darauf hin, dass organisatorische Maßnahmen allein keinen technischen Herkunftsnachweis des Geräts liefern [6]. Für nicht netzwerkfähige Feldgeräte ergibt sich daraus eine Lücke zwischen praktischer Zuordnung (Asset-Verwaltung) und technischer, beweisbarer Geräteauthentizität. Weiterhin gibt es auch Einsatzbereiche, die nicht physisch schützbar sind, da sie öffentlich zugänglich sind. Beispielsweise Sensoren, die im Bereich Wastewater, also z.B. Kanalisation, eingesetzt werden.

2.3.4 Warum gibt es keine Kryptografie?

Dieses Kapitel ordnet ein, weshalb kryptografisch abgesicherte Kommunikation in nicht netzwerkfähigen Feldgeräten historisch nur eingeschränkt umgesetzt wurde und welche Entwicklungen diese Situation heute verändern.

Nicht netzwerkfähige Feldgeräte sind häufig für besonders robuste und energieeffiziente Betriebsbedingungen ausgelegt. Bei loop-versorgten 2-Draht-Geräten muss die gesamte Elektronik aus dem begrenzten Energiehaushalt der 4 mA–20 mA-Stromschleife betrieben werden.

Abzüglich Toleranzen und Puffer, stehen 4...20mA Geräten ein Strom von ca. 3,5mA zur Verfügung [johnson_power_2013.] Daraus resultiert, dass Mikrocontroller in Feldgeräten oft mit niedrigen Taktraten betrieben werden und die verfügbaren Ressourcen auf das für Messwerterfassung, Signalverarbeitung, Diagnose und Kommunikation notwendige Minimum optimiert sind.

Kryptografische Verfahren, insbesondere asymmetrische Verfahren sowie moderne, authentifizierte Verschlüsselung, sind in reiner Softwareausführung vergleichsweise rechenintensiv. In ressourcenbeschränkten Feldgeräten führt dies typischerweise zu langen Ausführungszeiten und erhöhtem Energieverbrauch. Für den Anlagenbetrieb kann dies problematisch sein, da zusätzliche Latenzen im Kommunikations- oder Parametrierpfad auftreten und gleichzeitig der ohnehin knappe Leistungsrahmen belastet wird. In der Konsequenz wurden Sicherheitsmechanismen in vielen Feldgeräte-kategorien entweder gar nicht vorgesehen oder auf einfache Schutzfunktionen (z. B. Schreibschutz, PIN/Lock, organisatorische Prozesse) beschränkt [2].

Diese Situation wird durch die lange Nutzungsdauer industrieller Feldgeräte zusätzlich verstärkt. Feldgeräte verbleiben häufig über Zeiträume von 10 bis 15 Jahren (oder länger) im Betrieb. Gerätewechsel sind kostenintensiv, erfordern Stillstände und sind durch Zertifizierungen, und qualitätssichernde Prozesse gebremst. Dadurch existiert eine große installierte Basis an Legacy-Geräten, deren Hardwareplattformen nicht für moderne Kryptografie ausgelegt wurden. Selbst wenn neue Sicherheitsanforderungen entstehen, setzen sie sich in der Feldebene daher nur langsam durch [2].

In den letzten Jahren hat sich die Hardwarelandschaft jedoch deutlich weiterentwickelt. Moderne Mikrocontroller für Industrie- und Embedded-Anwendungen integrieren zunehmend dedizierte Krypto-Beschleuniger, etwa für AES, SHA und elliptische Kurvenverfahren (ECC). Ergänzend werden Sicherheitsfunktionen wie geschützte Schlüsselspeicher, sichere Bootketten, TrustZone-basierte Isolierung, manipulationsresistente Speicherbereiche oder externe Secure-Elemente verfügbar. Dadurch verlagern sich rechenintensive kryptografische Primitive in spezialisierte Hardwareblöcke, die sowohl schneller als auch energieeffizienter arbeiten als reine Softwareimplementierungen. Beispielhafte Messungen für einen STM32U3-Mikrocontroller zeigen diesen Effekt deutlich: Für AES-128 im Galois/Counter Mode (GCM) wird in der dedizierten Krypto-Hardware ein Datendurchsatz von etwa $9,17 \text{ MB s}^{-1}$ erreicht, während eine reine Software-Implementierung auf demselben Controller lediglich etwa $0,76 \text{ MB s}^{-1}$ erzielt. Für SHA-256 liegen die gemessenen Durchsätze bei $45,87 \text{ MB s}^{-1}$ in Hardware gegenüber $1,355 \text{ MB s}^{-1}$ in Software [5]. Somit ist die Verarbeitung in Hardware ca. 12- bzw. 34-mal schneller als in Software. Während diese Werte natürlich von Controller, Krypto-Peripherie und Implementierung des Algorithmus abhängen, zeigen sie doch deutlich, um welche Größenordnung die Aktionen beschleunigt werden können.

Aus Systemsicht hat dies zwei Konsequenzen. Erstens wird Kryptografie unter den Randbedingungen der Feldebene überhaupt erst praktikabel, weil Energie- und Laufzeitkosten pro Operation sinken. Zweitens eröffnen sich dadurch neue Architekturoptionen: Auch ohne vollwertigen IP-Stack kann ein Gerät kryptografische Operationen, Schlüsselableitung und geschützte Datenübertragung realisieren, sofern ein zuverlässiger Byte-Transportkanal vorhanden ist. Damit werden auf IP basierende Konzepte prinzipiell auch über serielle oder proprietäre Feldschnittstellen denkbar, vorausgesetzt Protokollaufbau und Nachrichtenformate werden an die beschränkten Ressourcen angepasst.

Trotz der verbesserten Hardwarebasis bleibt eine wesentliche Lücke bestehen: Für viele nicht-IP-basierte Feldkommunikationswege existiert kein breit etablierter Standard, der eine kryptografisch eindeutige Geräteidentifikation bietet. Das obwohl mittlerweile durch entsprechende HW, die Möglichkeit kryptografische Operationen in akzeptabler Zeit durchzuführen, da ist.

2.4 Public-Key-Infrastrukturen und Zertifikate

2.4.1 Rolle von PKI in industriellen Kommunikationssystemen

2.4.2 Architektur industrieller PKI

2.4.3 Geräteidentitäten auf Basis von Zertifikaten

2.5 Regulatorische Anforderungen an Feldgeräte

2.5.1 IEC 62443-4-2

2.5.2 Cyber Resilience Act

3 Bedrohungsmodell

Literaturverzeichnis

- [1] Babel, W. *Systemintegration in Industrie 4.0 und IoT: Vom Ethernet bis hin zum Internet und OPC UA*. 1st ed. 2024. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2024. 1 S. ISBN: 978-3-658-42987-4. DOI: 10.1007/978-3-658-42987-4 (siehe S. 8, 9).
- [2] BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. *ICS Security Kompendium V2.0*. 23. Apr. 2024. (Online - zuletzt aufgerufen am 30.01.2026) (siehe S. 8–10, 13).
- [3] Deutschland, Hrsg. *IT-Grundsicherheits-Kompendium*. 6. Edition. Köln: Reguvis, 2023. ISBN: 978-3-8462-0906-6 (siehe S. 8).
- [4] Niemann, K.-H. ; Merklin, S. „OT-Sicherheitsanforderungen für Ethernet-APL-Feldgeräte : Technologischer Wandel kann zu besserem Schutz führen“. In: (2022). Artwork Size: 611 KB, 9 pages Medium: application/pdf, 611 KB, 9 pages. ISSN: 2625-4212. DOI: 10.25968/OPUS-2320. URL: <https://serwiss.bib.hs-hannover.de/2320> (online - zuletzt aufgerufen am 05.02.2026) (siehe S. 10).
- [5] Oryx Embedded. *Benchmark Results for STM32U3 Crypto*. URL: <https://www.oryx-embedded.com/benchmark/st/crypto-stm32u3.html> (online - zuletzt aufgerufen am 03.02.2026) (siehe S. 13).
- [6] Stouffer, K., Pease, M., Tang, C., Zimmerman, T., Pillitteri, V., Lightman, S., Hahn, A., Saravia, S., Sherule, A. ; Thompson, M. *Guide to Operational Technology (OT) security*. NIST SP 800-82r3. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards ; Technology (U.S.), 28. Sep. 2023, NIST SP 800-82r3. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-82r3. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r3.pdf> (online - zuletzt aufgerufen am 05.02.2026) (siehe S. 12).