THEMENWOCHE 1 · LERNFELD 7

Grundlagen cyber-physischer Systeme

CPS verstehen, Kommunikationswege einordnen, MQTT und QoS erklären

Material 1 von 5 · Lernendenfassung

> Arbeitsweise: Nutze dieses Nachschlagewerk passend zu den Aufgaben. Übernimm Definitionen nicht nur, sondern wende sie auf deine gewählten Anwendungsfälle an.

Lernziele und Vorwissen

Am Ende der Themenwoche kannst du ...

- Grundbegriffe aus dem Themenbereich CPS erläutern und an Beispielen unterscheiden,
- Smart Factory und Smart Home nach Zielsetzung und technischen Anforderungen vergleichen,
- Anforderungen an eine IoT-Plattform strukturiert darstellen,
- Optimierungsziele sowie Chancen, Risiken und Schutzmaßnahmen beschreiben,
- wichtige Übertragungstechnologien nach Reichweite, Datenrate und Energiebedarf einordnen,
- das MQTT-Prinzip mit Publisher, Subscriber, Broker, Topic und Payload erklären,
- QoS 0, QoS 1 und QoS 2 unterscheiden und passenden Anwendungen zuordnen,
- einen MQTT-Anwendungsfall als nachvollziehbares Schaubild darstellen.

Die Themenwoche als Lernweg

Phase	Schwerpunkt	Ergebnis
1	Mikrocontroller-Auswahl	Anforderungen, Vergleich, Entscheidung
2	CPS und IoT	Begriffe, Funktionsmodell, Chancen und Risiken
3	Kommunikation	Protokollvergleich, MQTT und QoS
4	Transfer	eigener Anwendungsfall, e-Portfolio, Reflexion

1 · Grundbegriffe und Industrie 4.0

Cyber-physische Systeme verbinden reale technische Vorgänge mit digitaler Verarbeitung und Kommunikation. Sie erfassen Zustände, verarbeiten Daten, tauschen Informationen aus und können über Aktoren auf ihre Umwelt einwirken.

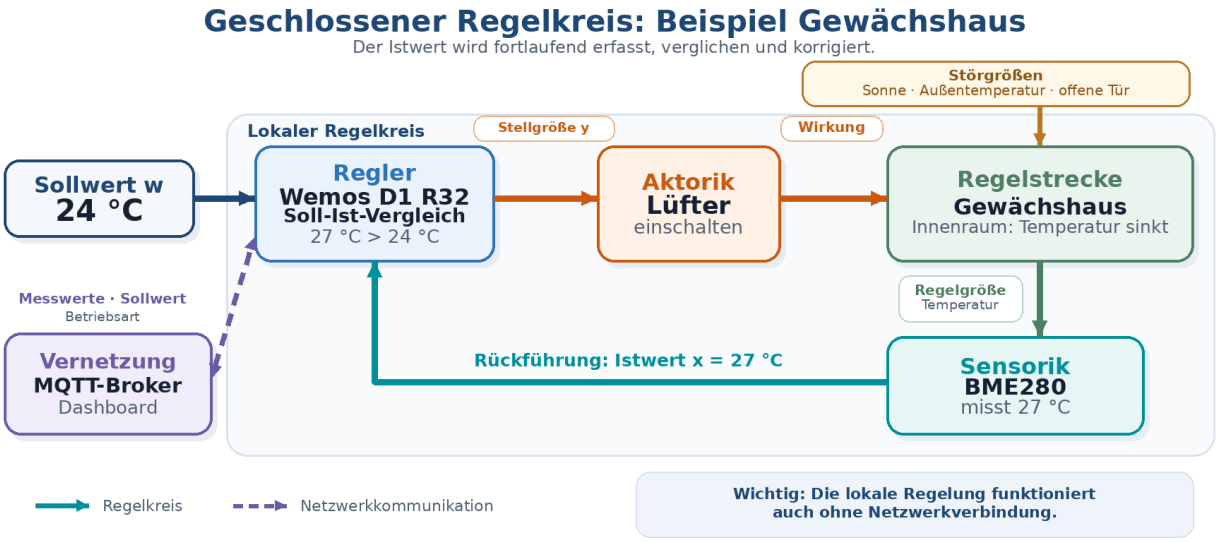
Begriff	Kernaussage	Beispiel
CPS	Verbund aus physischen Komponenten, Software, Datenverarbeitung und Vernetzung	smarte Heizungsregelung
CPPS	CPS im industriellen Produktionsumfeld	vernetzte Fertigungszelle
IoT	global vernetzte physische und virtuelle Objekte mit eindeutiger Identität	vernetzte Wetterstation
IIoT	IoT für Industrie, Maschinen, Anlagen und Produktionsdaten	Zustandsüberwachung eines Motors
Smart Factory	selbstorganisierende und optimierende Produktionsumgebung	adaptive Fertigungslinie
Smart Home	vernetzte Gebäude- und Haushaltsfunktionen für Komfort, Sicherheit und Energie	Fensterkontakt mit Heizungssteuerung
Smart City	vernetzte städtische Infrastruktur und Dienste	bedarfsgerechte Straßenbeleuchtung

Von der Automatisierung zum CPS

Generation	Leitidee	Typische Technik
1.0	Mechanisierung	Dampfmaschine, mechanischer Webstuhl
2.0	Massenproduktion	Elektrifizierung, Fließband
3.0	Automatisierung	Elektronik, SPS, CNC, IT-Systeme
4.0	Vernetzung und Selbstorganisation	IoT, CPS, Datenanalyse, Smart Factory

> **Merksatz:** Industrie 4.0 bedeutet nicht nur mehr Automatisierung. Neu ist vor allem die durchgängige Vernetzung: Komponenten besitzen Daten, kommunizieren und können ihr Verhalten dezentral anpassen.

2 · Aufbau und Funktionsweise eines CPS



Baustein	Aufgabe	Leitfrage
Sensorik	physikalische Größen erfassen und in Daten überführen	Was wird gemessen?
Verarbeitung	Daten prüfen, vergleichen, speichern und Regeln ausführen	Wie wird entschieden?
Aktorik	physisch auf einen Prozess oder die Umwelt einwirken	Was wird verändert?
Vernetzung	Daten und Befehle zwischen Komponenten austauschen	Wer kommuniziert womit?
Adaption	Verhalten anhand von Daten, Regeln oder Modellen anpassen	Wie reagiert das System auf Änderungen?

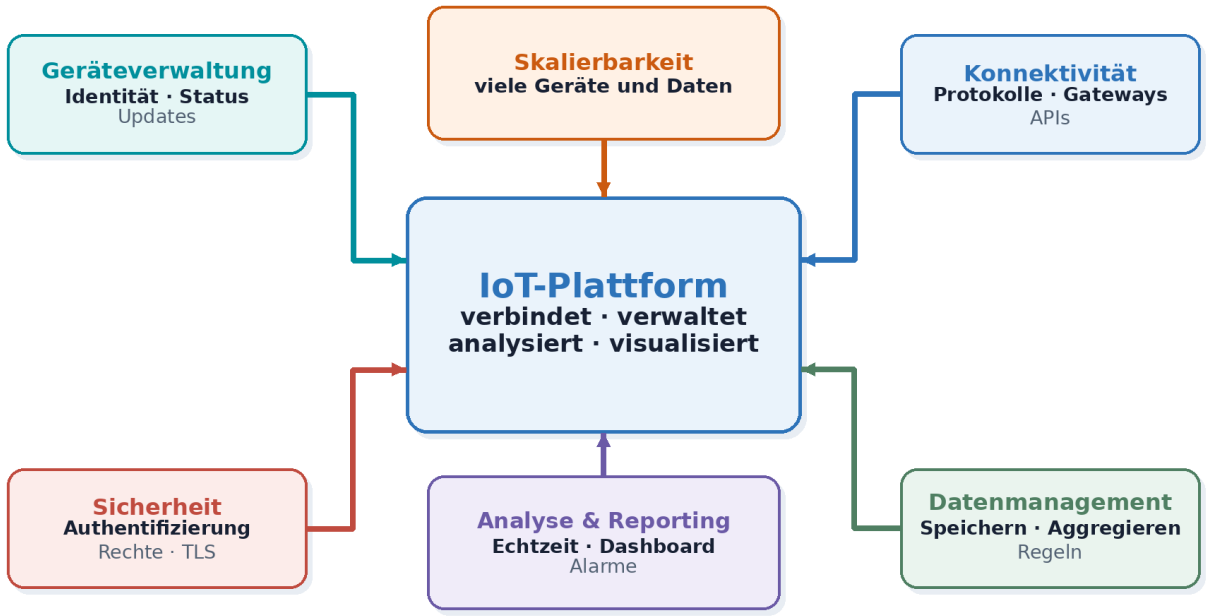
Steuerung und Regelung

Bei einer Steuerung wirkt eine Eingabe nach festgelegten Regeln auf den Ausgang. Eine Regelung nutzt zusätzlich eine Rückkopplung: Der Ist-Wert wird erneut gemessen und mit dem Soll-Wert verglichen. Dadurch kann das System Abweichungen fortlaufend korrigieren.

> **Regelkreis:** Beispiel Gewächshaus: Der BME280 misst 27 °C. Der Wemos D1 R32 vergleicht den Istwert mit dem Sollwert 24 °C und schaltet den Lüfter ein. Die Temperatur sinkt und wird erneut gemessen.

3 · Anforderungen an eine IoT-Plattform

Eine IoT-Plattform verbindet viele Geräte, Datenquellen und Anwendungen. Sie muss technische Vielfalt beherrschbar machen und zugleich einen sicheren, wartbaren Betrieb ermöglichen.



Sechs Anforderungsbereiche wirken gemeinsam auf die zentrale IoT-Plattform.

Anforderungsbereich	Dazu gehören
Geräteverwaltung	Registrierung, eindeutige Identität, Status, Konfiguration, Firmware-Updates
Konnektivität	unterschiedliche Netze und Protokolle, Gateways, offene APIs, Interoperabilität
Datenmanagement	Erfassung, Speicherung, Strukturierung, Aggregation und Aufbewahrung
Analyse und Reporting	Echtzeitauswertung, Muster, Alarme, Dashboards, Kennzahlen
Sicherheit	Authentifizierung, Autorisierung, Verschlüsselung, Protokollierung, Updates
Skalierung und Betrieb	wachsende Gerätezahl, Verfügbarkeit, Überwachung, Fehlermanagement

4 · Anwendungsfelder und Optimierungsziele

Anwendungsfeld	Ziel	Beispiele
Smart Home	Komfort, Sicherheit und Energieeffizienz	Heizung, Beleuchtung, Zugang, Raumklima
Smart Factory	Produktivität, Qualität, Flexibilität und Verfügbarkeit	Maschinenzustand, Werkzeugdaten, Produktionsplanung
Automotive	Sicherheit, Assistenz, Diagnose und Vernetzung	Fahrerassistenz, Flotten- und Fahrzeugdaten
Smart Health	Monitoring, Prävention und Unterstützung	Wearables, Telemedizin, Medikamentenmanagement
Smart City	effiziente Infrastruktur und bessere Dienste	Verkehr, Energie, Wasser, Abfall, Beleuchtung
Consumer	vernetzte Produkte und neue Dienste	Smartwatch, Sprachassistenz, Tracking

Smart Factory und Smart Home vergleichen

Aspekt	Smart Factory	Smart Home
Hauptziel	Produktionsleistung, Qualität, Anlagenverfügbarkeit	Komfort, Sicherheit, Energie, Alltagstauglichkeit
Folgen eines Ausfalls	Produktionsstillstand, Ausschuss, Sicherheitsrisiken	Komfortverlust; je nach Funktion auch Sicherheitsrisiken
Lebensdauer	lange Anlagenzyklen, planbare Wartung	kürzere Produktzyklen, einfache Bedienung
Integration	Maschinen, MES/SCADA/ERP, industrielle Standards	Apps, Sprachassistenz, Herstellerplattformen

Typische Optimierungsziele in der Smart Factory

- Maschinenverfügbarkeit erhöhen und Stillstände früh erkennen,
- Energieverbrauch und Materialeinsatz reduzieren,
- Produktionsprozesse maschinenübergreifend koordinieren,
- Werkzeuge, Aufträge und Produktdaten lückenlos identifizieren,
- Qualitätskontrolle über den gesamten Fertigungsprozess sichern.

5 · Chancen, Risiken und Gegenmaßnahmen

Chance	Zugehöriges Risiko	Geeignete Gegenmaßnahmen
Echtzeitdaten und Transparenz	Überwachung, Datenschutzverletzung	Datenminimierung, Rollen, Zweckbindung, Protokollierung
Automatisierte Reaktion	Fehlentscheidung oder ungewollte Aktion	Grenzwerte, Plausibilitätsprüfung, sicherer Zustand, manuelle Übersteuerung
Fernzugriff und Wartung	unberechtigter Zugriff	starke Authentifizierung, VPN/TLS, segmentierte Netze, Rechtekonzept
Vorausschauende Wartung	falsche Prognose oder Datenlücke	Messwertqualität, Redundanz, Alarmregeln, fachliche Prüfung
Skalierbare Vernetzung	größere Angriffsfläche und Abhängigkeit	Inventar, Updates, Monitoring, Notfall- und Wiederanlaufplan
Energieoptimierung	Rebound-Effekt durch mehr Geräte und Nutzung	Gesamtverbrauch messen, Lebenszyklus betrachten, Abschaltkonzept

Wichtig: Sicherheit ist keine einzelne Zusatzfunktion. Sie betrifft Gerät, Netzwerk, Broker/Plattform, Anwendung, Benutzerkonten und den gesamten Lebenszyklus.

Rebound-Effekt

Effizientere Technik senkt den Verbrauch je Vorgang. Wenn dadurch jedoch mehr Geräte eingesetzt oder Funktionen häufiger genutzt werden, kann ein Teil der erwarteten Einsparung wieder verloren gehen. Bewertet deshalb nicht nur ein einzelnes Gerät, sondern den Gesamtverbrauch des Systems.

6 · Mikrocontroller als Kern eines CPS

Mikrocontroller erfassen Sensorwerte, führen ein festes Programm aus und steuern Aktoren. Mit integrierter Netzwerkschnittstelle werden sie zu kompakten CPS-Komponenten. Ein Einplatinencomputer ist dagegen ein vollständiger Computer mit Betriebssystem und eignet sich für umfangreichere Dienste.

Merkmal	Mikrocontrollerboard (MCU)	Einplatinencomputer (SBC)
Betrieb	ein Programm bzw. Firmware, meist zyklisch	Betriebssystem, mehrere Prozesse
Startzeit	kurz und vorhersehbar	länger, abhängig vom Betriebssystem
Energiebedarf	meist niedrig	meist höher
Echtzeitnähe	gut für direkte Sensor-/Aktorsteuerung	zusätzliche Softwareebenen
Ressourcen	begrenzt, an Aufgabe angepasst	mehr RAM, Speicher und Rechenleistung
Typische Rolle	Edge-Gerät, Sensor-/Aktor-Knoten	Gateway, lokale Analyse, Serverdienste

Wemos D1 R32 als Projektplattform

Der Wemos D1 R32 basiert auf einem ESP32 und verbindet digitale/analoge Ein- und Ausgänge mit WLAN und Bluetooth. Damit kann er Sensoren auslesen, Aktoren steuern und Messwerte über ein Netzwerk übertragen. In Themenwoche 2 und 3 wird daraus ein funktionsfähiger CPS-Prototyp.

> **Entscheidungsregel:** Ein leistungsfähiges Board ist nicht automatisch die beste Wahl. Entscheidend sind die konkreten Anforderungen: I/O, Schnittstellen, Funk, Energie, Baugröße, Kosten, Entwicklungsaufwand und Wartbarkeit.

7 · Kommunikation und Protokolle einordnen

In einem CPS wirken mehrere Protokolle zusammen. Ein Funkstandard beschreibt beispielsweise den Übertragungsweg; MQTT organisiert auf Anwendungsebene den Nachrichtenaustausch.

Vereinfachte OSI-Ebene	Aufgabe	Beispiele im IoT
Anwendung	Nachrichten, Dienste und Datenmodell	MQTT, HTTP, CoAP, OPC UA
Transport	Ende-zu-Ende-Übertragung	TCP, UDP
Vermittlung	Adressierung und Weiterleitung	IPv4, IPv6, 6LoWPAN
Sicherung/physisch	Zugang zum Medium und Übertragung	WLAN, Ethernet, BLE, Zigbee, Mobilfunk, LoRaWAN

Auswahlfaktoren

- Reichweite und Abdeckung, Datenrate und Nachrichtengröße,
- Energiebedarf und mögliche Batterielaufzeit,
- Latenz, Zuverlässigkeit und Verhalten bei Verbindungsabbrüchen,
- Anzahl der Geräte, Skalierbarkeit und Netzwerktopologie,
- Sicherheit, Interoperabilität, Infrastruktur und laufende Kosten.

> **Schichtenprinzip:** Nicht entweder/oder: Ein Temperatursensor kann per WLAN mit dem Netz verbunden sein und seine Messwerte gleichzeitig per MQTT an einen Broker senden.

8 · Drahtlose Übertragungstechnologien

Technologie	Charakter	Stärken	Typische Anwendungen
WLAN	lokales IP-Netz, hohe Datenrate	verbreitet, direkte IP-Anbindung	Smart Home, Kameras, lokale Sensoren
Bluetooth	kurze Distanz, Punkt-zu-Punkt	breite Geräteunterstützung	Zubehör, Bedienung, Audio
BLE	kurze Distanz, energiesparend	lange Batterielaufzeit	Beacons, Wearables, Sensoren
Zigbee	Low-Power-Mesh	viele Knoten, robuste Vermaschung	Gebäudeautomation, Sensor-/Aktor-Netze
Z-Wave	Low-Power-Mesh im Sub-GHz-Bereich	für Gebäudeautomation entwickelt	Smart-Home-Komponenten
NFC	wenige Zentimeter	bewusste Nähe, einfache Kopplung	Zahlung, Identifikation, Pairing
RFID	Identifikation per Funk; Reichweite systemabhängig	passive Tags möglich	Logistik, Zugang, Werkzeugverfolgung

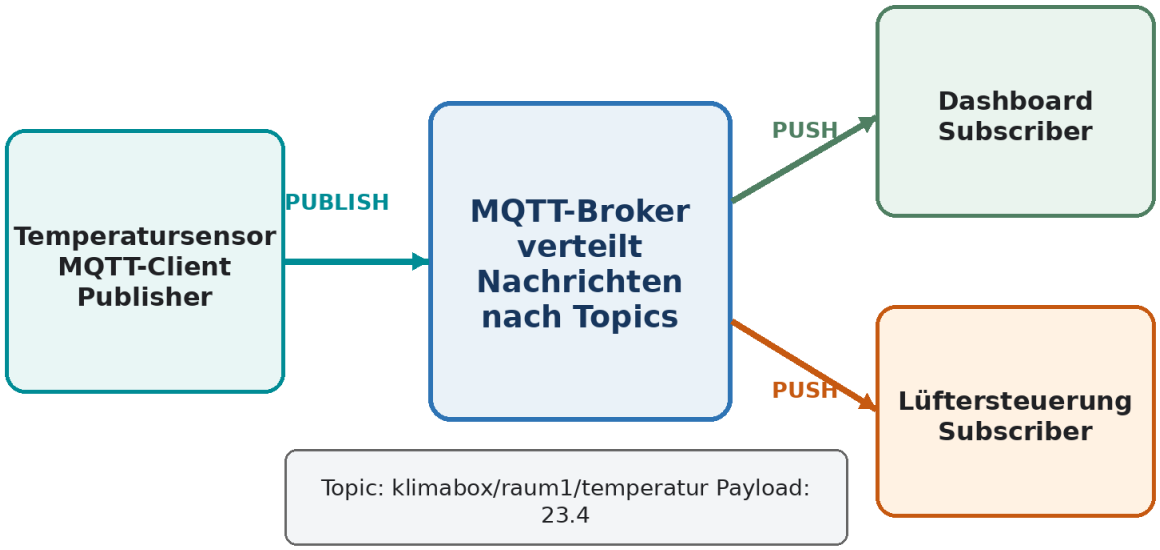
Weitverkehr und LPWAN

Technologie	Charakter	Geeignet, wenn ...
LoRaWAN	lange Reichweite, kleine Datenmengen, niedriger Energiebedarf	eigene oder öffentliche LoRaWAN-Infrastruktur verfügbar ist
NB-IoT / LTE-M	Mobilfunknetz für IoT-Geräte	große Abdeckung und lange Batterielaufzeit benötigt werden
LTE / 5G	hohe Datenrate und Mobilität	Echtzeitnähe oder größere Datenmengen wichtig sind
Sigfox	anbietergebundenes LPWAN mit sehr kleinen Nachrichten	Netz und Dienst am Standort verfügbar sind

> **Hinweis:** Reichweiten und Datenraten hängen stark von Standardversion, Frequenz, Antenne, Umgebung, Sichtverbindung und regionaler Infrastruktur ab. Nutze für konkrete Projekte immer aktuelle Hersteller- und Betreiberangaben.

9 · MQTT: Publish/Subscribe über einen Broker

MQTT ist ein leichtgewichtiges Nachrichtenprotokoll auf Anwendungsebene. Clients verbinden sich mit einem Broker. Ein Client kann Nachrichten veröffentlichen, Themen abonnieren oder beides tun.



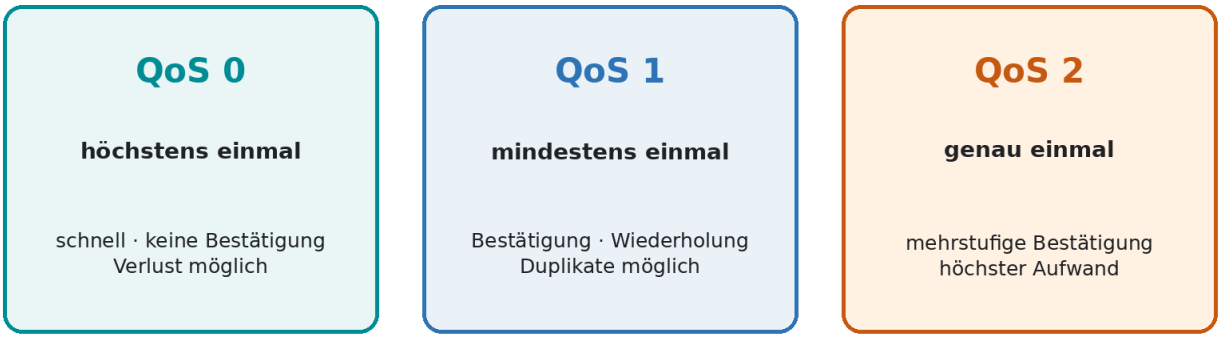
Begriff	Bedeutung	Beispiel
Publisher	veröffentlicht eine Nachricht	Sensor sendet 23.4
Broker	nimmt Nachrichten an, filtert nach Topics und verteilt	Mosquitto-Server
Subscriber	abonniert Topics und erhält passende Nachrichten	Dashboard
Topic	hierarchischer Name zur Zuordnung	klimabox/raum1/temperatur
Payload	eigentliche Nutzlast	23.4 oder JSON-Datensatz

Topics sinnvoll aufbauen

- kurz, eindeutig und ohne Leerzeichen oder Umlaute,
- eine feste Hierarchie verwenden, z. B. system/ort/geraet/messgroesse,
- + ersetzt beim Abonnieren genau eine Ebene; # ersetzt alle folgenden Ebenen,
- Groß- und Kleinschreibung beachten.

> **Vorteil:** MQTT entkoppelt Sender und Empfänger. Beide müssen nur den Broker und die vereinbarte Topic-Struktur kennen.

10 · Quality of Service und Last Will



Stufe	Zustellsemantik	Aufwand	Passendes Beispiel
QoS 0	höchstens einmal; keine Bestätigung	gering	häufige, unkritische Temperaturwerte
QoS 1	mindestens einmal; Bestätigung und Wiederholung	mittel	Maschinenalarm mit Duplikaterkennung
QoS 2	genau einmal über einen mehrstufigen Austausch	hoch	seltene Buchung, bei der Duplikate problematisch sind

Genauigkeit: QoS gilt jeweils für eine MQTT-Verbindung, zum Beispiel Publisher -> Broker und Broker -> Subscriber. Eine genau einmal verarbeitete Geschäftsaktion muss die Anwendung zusätzlich durch eindeutige Nachrichten-IDs und idempotente Verarbeitung absichern.

Last Will and Testament (LWT)

Ein Client hinterlegt beim Verbindungsaufbau beim Broker eine Will-Nachricht. Bricht die Verbindung unerwartet ab, veröffentlicht der Broker diese Nachricht stellvertretend, zum Beispiel klimabox/raum1/status = offline. Bei einer sauberen Abmeldung wird sie nicht ausgelöst.

Weitere nützliche MQTT-Mechanismen

- Retained Message: Der Broker speichert den letzten Wert eines Topics und liefert ihn neuen Subscribern sofort.
- Persistent Session: Abonnements und je nach Konfiguration Nachrichten überdauern eine Unterbrechung.
- Keep Alive: Client und Broker prüfen regelmäßig, ob die Verbindung noch besteht.
- TLS und Rechte: Verschlüsselung und Topic-bezogene Zugriffsregeln müssen zusätzlich eingerichtet werden.

11 · Vom Anwendungsfall zum Projekt

Bevor in Themenwoche 2 programmiert wird, muss der Anwendungsfall als CPS verstanden sein. Nutze dafür die folgende Prüfkette.

Schritt	Leitfrage	Beispiel Raumklima
1 · Umwelt	Welcher reale Zustand ist relevant?	Temperatur und Luftfeuchte
2 · Sensorik	Wie wird der Zustand erfasst?	digitaler Klimasensor
3 · Verarbeitung	Welche Regeln und Grenzwerte gelten?	Warnung oberhalb Grenzwert
4 · Aktorik	Wie kann das System reagieren?	LED, Lüfter oder Signal
5 · Vernetzung	Welche Daten gehen wohin?	Messwert per MQTT an Broker
6 · Sicherheit	Was passiert bei Fehler oder Ausfall?	Plausibilitätsprüfung, LWT, sicherer Zustand
7 · Nachweis	Wie wird die Funktion geprüft?	Testfälle, Protokoll, Screenshot

Kurzglossar

Begriff	Kurzdefinition
Client	Netzwerkteilnehmer, der sich mit dem MQTT-Broker verbindet
Broker	zentraler Vermittler für MQTT-Nachrichten
Topic	hierarchischer Nachrichtenkanal
Payload	Inhalt der Nachricht
QoS	vereinbarte Zustellsemantik einer MQTT-Verbindung
LWT	Broker-Nachricht bei unerwartetem Verbindungsabbruch eines Clients

Selbstcheck

- Ich kann ein CPS an Sensorik, Verarbeitung, Aktorik und Vernetzung erklären.
- Ich kann für einen Anwendungsfall eine passende Übertragungstechnologie begründen.
- Ich kann MQTT mit Broker, Publisher, Subscriber, Topic und Payload darstellen.
- Ich kann für QoS 0, 1 und 2 je ein begründetes Beispiel nennen.