TEKO

Höhere Fachschule TEKO Bern
Dipl. Systemtechniker/in HF 2026



Diplomarbeit
Mould Condition Monitoring System

Verfasser:	Arjen Hoti
Betreuungsperson:	Fabian Hirter
Experte:	Benjamin Engler
Abgabe:	02. November 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Management Summary 5
2 Lebenslauf 6
3 Einleitung 8
3.1 Ausgangslage und Problemstellung 8
3.2 Grundannahmen 9
3.3 Zielsetzung 9
3.4 Abgrenzung 9
3.5 Vorgehensmethodik 10
3.6 Risikoanalyse 11
3.6.1 Risiko Management Formular (vereinfachte Version) 12
3.6.2 Risikoportfolio 14
3.6.3 Analyse der Risikobewertung und Präventionsmassnahmen 14
3.7 Projektstrukturplan 15
4 Aufgabenstellung 16
4.1 Pflichtenheft 16
5 Projektplanung 19
5.1 Terminplan und Meilensteine 19
5.2 Meilensteine 20
5.3 Kritischer Pfad 21
6 Grundlagen 22
6.1 Was ist ein Spritzgiesswerkzeug? 22
6.1.1 Aufbau 22
6.1.2 Das Umbausatz Konzept 23
6.1.3 Materialien und Präzision 24
6.1.4 Kosten und Investition 24
6.1.5 Warum Zustandsüberwachung relevant ist 24
6.2 Betriebsphasen eines Spritzgusswerkzeugs 25
6.3 Schadensmechanismen 31
6.4 Taupunktberechnung und Kondensationsrisiko 33
6.4.1 Berechnung 33
6.4.2 Schwellenwert Kondensationsrisiko 34
6.4.3 Rechenbeispiel 35
6.5 Marktanalyse bestehender Systeme 36
6.5.1 Kistler ComoNeo 36
6.5.2 Hack moldlife® sense 36
6.5.3 männer moldMind II 37
6.5.4 Digital Moulds Mould Monitoring 37
6.5.5 Einordnung 38
6.6 Anwenderprofil - Benutzerkompetenzen im Werkzeugbau 39
6.6.1 Vorgehen 39

6.6.2 Ergebnisse ... 39
6.6.3 Lücke zwischen Aufgaben und Anforderungen ... 40
6.6.4 Kontrollfälle ... 40
6.6.5 Schlussfolgerung für das System ... 41
7 Bewertungsmethodik ... 42
7.1 Definition der Bewertungsmerkmale ... 42
7.2 Präferenzmatrix (Bleistiftmethode) ... 43
7.2.1 Auswertung ... 43
8 Systemkonzept ... 45
8.1 Vorgehen ... 45
8.2 Systemarchitektur ... 46
8.3 Hardwareplattform - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller ... 48
8.3.1 Ausgangslage ... 48
8.3.2 Anforderungsabgleich ... 48
8.3.3 Einschränkungen ... 49
8.3.4 Entscheid ... 49
8.4 Sensorik ... 50
8.4.1 Festlegung: Durchgängiges Sensor-Ökosystem ... 50
8.4.2 Messintervalle und Erfassungsstrategie ... 50
8.4.3 Temperatur und Luftfeuchtigkeit ... 52
8.4.4 Beschleunigung und Schockerkennung ... 56
8.4.5 Werkzeugbewegung und digitale Eingänge ... 60
8.5 Schnittstellen und Verkabelung ... 64
8.5.1 Steckersystem ... 64
8.5.2 Kabelbelegung: Same Side und Reverse Side ... 66
8.5.3 Verriegelung ... 67
8.5.4 Farbkonzept der Kabel ... 67
8.6 Kommunikationskonzept ... 68
8.7 Speicherarchitektur und Ereignismodell ... 69
8.7.1 Ereignismodell ... 69
8.7.2 Datensatz und Ringpuffer ... 69
8.7.3 Speicherebenen ... 70
8.7.4 Speicherkapazität ... 70
8.8 Energieversorgungskonzept ... 71
8.8.1 Berechnung der Akkubetriebsdauer ... 72
9 Bedien- und Interaktionskonzept ... 74
9.1 Bediengrundsätze ... 74
9.2 Bedienabläufe und Inbetriebnahme ... 74
9.3 Menüstruktur und Display-Layout ... 76
10 Hardware-Entwicklung ... 78
10.1 Schaltungsentwurf ... 78

10.2 Gehäuse ... 80
10.3 Aufbau und Stückliste ... 90
11 Firmware-Entwicklung ... 92
11.1 Aufbau des Codes ... 93
11.2 Abläufe ... 96
11.3 Erfassung ... 99
11.4 Zustandsautomat ... 102
11.5 Energieverwaltung ... 104
11.6 Speicher ... 106
11.7 Schnittstellenspezifikation ... 107
11.8 Bekannte Grenzen ... 108
12 Test und Validierung ... 110
12.1 T1 Funktionstest Inbetriebnahme und Schnittstelle ... 110
12.2 T2 Dauerlauf am Maschinensimulator ... 110
12.3 T3 Falltest Schockerkennung ... 112
12.4 T4 Transport- und Lagertest im Akkubetrieb ... 113
12.5 T5 Bedientest mit Werkzeugbauern ... 113
13 Überprüfung der Anforderungen ... 115
13.1 Pflichtenheftprüfung ... 115
13.2 Zeitkontrolle (Soll/Ist) ... 117
14 Reflexion und Diskussion ... 118
14.1 Reflexion und Lessons Learned ... 118
14.2 Diskussion der Ergebnisse ... 119
15 Fazit Empfehlung und Ausblick ... 121
15.1 Fazit ... 121
15.2 Empfehlung ... 121
15.3 Ausblick ... 121
16 Schlusswort und Danksagung ... 123
17 Eigenständigkeitserklärung ... 124
18 Glossar ... 125
19 Literaturverzeichnis ... 127
20 Abbildungsverzeichnis ... 129
21 Tabellenverzeichnis ... 131
22 Hilfsmittel und Tools ... 132
23 Anhang ... 133

1 Management Summary

Spritzgusswerkzeuge stellen mit Anschaffungskosten im sechsstelligen Bereich bedeutende Investitionsgüter dar, deren Werterhalt für Unternehmen von grosser wirtschaftlicher Bedeutung ist. Schäden entstehen dabei nicht nur während der Produktion, sondern auch durch Korrosion bei der Lagerung, mechanische Belastungen beim Transport oder Fehlbedienungen bei unzureichender Werkzeugtemperatur. Bestehende Überwachungssysteme konzentrieren sich überwiegend auf den laufenden Produktionsprozess, sind kostenintensiv und liefern nach dem Abspannen des Werkzeugs keine weiteren Zustandsdaten. Daraus ergibt sich der Bedarf nach einer kostengünstigen Überwachungslösung, die dauerhaft am Werkzeug verbleibt.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines eigenständigen Sensormoduls, das relevante Werkzeugzustände und Ereignisse unabhängig von der Produktionsmaschine erfasst und dokumentiert. Das System sollte ohne Cloud-Anbindung funktionieren, ein Materialbudget von CHF 300 einhalten und sich auch von Werkzeugmachern ohne vertiefte IT-Kenntnisse einrichten lassen. Zudem sollte die Lösung so dokumentiert werden, dass sie von Dritten nachgebaut und weiterentwickelt werden kann.

Die Entwicklung orientierte sich am Basis-Phasenkonzept. Die Anforderungen wurden aus einer Analyse typischer Schadensmechanismen und der Auswertung von zwölf Stellenprofilen im Werkzeugbau abgeleitet. Für die Komponentenauswahl wurden vier gewichtete Nutzwertanalysen durchgeführt, deren Kriterien vorgängig mittels Paarvergleich gewichtet wurden. Daraus entstand ein Prototyp mit eigens entwickelter Trägerplatine für den FireBeetle 2 ESP32-E, einem 3D-gedruckten Gehäuse mit E-Ink-Display und einer Firmware mit rund 5'900 Programmzeilen.

Der Prototyp erfasst Produktionszyklen interruptgesteuert, unterscheidet fünf Werkzeugzustände und erkennt Schockereignisse (Standardschwelle 1.5 g, konfigurierbar) sowie ein luftbasiertes Kondensationsrisiko anhand des Taupunkts. Die Ereignisse werden in einem Ringpuffer abgelegt, der für das angenommene Ereignisprofil rechnerisch über ein Jahr reicht, und über eine dokumentierte HTTP-Schnittstelle bereitgestellt. Drei abgestufte Schlafmodi ergeben für das angenommene Deep-Sleep-Szenario eine modellierte Akkulaufzeit von rund 189 Tagen; gemessen wurde sie nicht.

Die Funktionsfähigkeit wurde in mehreren Versuchen überprüft. Während eines 75-stündigen Dauerlaufs an einem Maschinensimulator wurden sämtliche Produktionszyklen fehlerfrei erfasst und alle fünf Test-Stürze zuverlässig als Schockereignisse erkannt. Zwei Werkzeugbauer der Ypsomed AG konnten das Gerät zudem ohne zusätzliche Anleitung einrichten. Mit Materialkosten von CHF 98.37 liegt der Prototyp unter dem vorgegebenen Budget.

Die Festanforderungen sind technisch realisiert und am Gerät geprüft; die Reichweite der einzelnen Nachweise ist in Kapitel 13 ausgewiesen. Die konkrete Verfügbarkeit der Nachbaudateien ist dort explizit berücksichtigt. Einschränkungen bestehen bei der Kondensationserkennung, die bisher ausschliesslich auf der Umgebungsluft basiert, sowie bei der auf 45 °C begrenzten Montagetemperatur aufgrund des Akkuladevorgangs. Zudem kann die interne Uhr ohne Netzwerkverbindung zeitlich abweichen. Die berechnete Akkulaufzeit konnte mangels direkter Strommessung noch nicht experimentell bestätigt werden.

Als nächster Schritt wird ein dreimonatiger Pilotversuch an drei Spritzgusswerkzeugen unter realen Betriebsbedingungen empfohlen. Darauf aufbauend sollen ein zusätzlicher Temperaturfühler an der Werkzeugoberfläche, eine unabhängige Echtzeituhr und ein für die Werkzeugumgebung geeignetes Gehäuse integriert werden. Hardware, Firmware und Dokumentation werden unter einer offenen Lizenz veröffentlicht, um die Nachbaubarkeit und Weiterentwicklung zu ermöglichen.

2 Lebenslauf



Arjen Hoti

3250 Lyss

Geburtsdatum: --.--.1997
Heimatort: ---
Nationalität: CH

Berufserfahrung

Produktmanager und Vertrieb **Swissframe AG** **April 2026 – Heute**

Neuaufbau Vertriebsstrategie für das Thermos-System (dezentrale Wohnungslüftung mit integrierter Mikrowärmepumpe, 30+ Sensoren, IoT-fähig via MQTT/REST API): Ziel 300 Systeme in 12 Monaten. Restrukturierung des gesamten Produktportfolios: Umklassifizierung von über 600 Einzelprodukten in drei strategische Segmente (Energiesystem, Modulbad, Objektbad). Erstellung sämtlicher Datenblätter, technischer Dokumentation, Verkaufsunterlagen und verkaufsunterstützender Materialien von Grund auf. Konzeption und Aufbau von MANUELA (Modular Artificial Neural Unification Engine for Lead Acquisition): KI-gestütztes Outbound-System auf n8n mit LLM-Integration, CRM-Anbindung und datengesteuertem Produktrouting. 16% Antwortrate auf Kaltakquise, automatische Terminbuchung relevanter Kontakte, automatische Erstellung von Kostenvoranschlägen. Entwicklung eines BIM-Tools gemeinsam mit dem Engineering, das Fachplanern die eigenständige Projektierung ermöglicht und den Beratungsaufwand pro Projekt reduziert. Prozessoptimierung des gesamten Verkaufszyklus auf Skalierbarkeit: Entkopplung von manuellem Aufwand pro Verkauf, damit Wachstum nicht proportional Ressourcen bindet. Technische Konzeptpräsentationen und Beratung von Architekten, Fachplanern, Sanitärplanern, GU/TU und institutionellen Bauherren. Erarbeitung datengestützter Wirtschaftlichkeitsargumentationen (Lifecycle-Kosten, Variantenvergleiche, Erdsonden-Eliminierung) als zentrales Verkaufsinstrument.

Product Manager Linear Actuators **Servomold GmbH** **März 2025 – April 2026**

Verantwortung für Produktsystematik und Weiterentwicklung linearer servoelektrischer Antriebssysteme
Markt- und Wettbewerbsanalyse im Bereich Medical Packaging & Devices
Key Account Management für medizinisch-regulierte Kunden (Beratung, Produktauslegung, Lösungsdesign)
Schnittstellenkoordination zwischen Entwicklung, Vertrieb, Anwendungstechnik und Fertigung
Mitwirkung an Produkteinführungen, technischer Dokumentation und regulatorischer Abstimmung (GMP-/FDA-Umfeld)

Product Development Engineer **Harting AG – Biel** **November 2024 – Februar 2025**

Entwicklung elektromechanischer Steckverbindersysteme mit Fokus auf Kunststoff- und Metallkomponenten
Erstellung und Pflege CAD-basierter Konstruktionen nach kunststoffgerechten Fertigungsrichtlinien (Spritzguss)
Mitwirkung bei werkstoffspezifischer Auswahl, Auslegung und Bewertung von Kunststoffbauteilen
Unterstützung der technischen Umsetzung im interdisziplinären Projektteam (Mechanik, Elektronik, Fertigung)

Mechanical Development Engineer **Ypsomed AG – Burgdorf** **August 2018 – November 2024**
Stv. Abteilungsleiter

Eigenständige Erstellung von 3D-CAD-Modellen und Zeichnungen (NX), Kunststoffgerechte Ausarbeitung von Baugruppen und Einzelteilen, Planung, Durchführung und Auswertung von Verifikationen und Tests, Technische Berechnungen (Festigkeit, Toleranz), Prototypenkoordination, Fachliche Betreuung von Konstrukteuren und Junior Engineers, Erstellung technischer Dokumentation gemäss normativer Vorgaben, Stellvertretung des Abteilungsleiters ab 2021, Entwicklung elektrischer Kernzugeinheiten, erfolgreiche Lizenzierung, Beteiligung am DMS-System (ECTR) & Einführung Wissensmanagement im Tool Manufacturing.

Auszeichnung: Ypsomed Innovation Award 2024

Seite 1 / 2

Patentanmeldungen

E 2025017	Harting AG	Spring mechanism to compensate tolerances in plug receptacle
EP 24196222.4	Ypsomed AG	Spritzgussverfahren mit Formteilorientierung
EP 23218182.6	Ypsomed AG	Kernzugeinheit für Spritzgusswerkzeug

Ausbildung

TEKO Schweizerische Fachschule **Bern** **Oktober 2023 – Oktober 2026**

Relevante Fachmodule: Systemprojektierung & Datenvernetzung , Steuer- & Regeltechnik, Embedded Systems Sensorik, Robotik & Automatisierung, Projekt- und Qualitätsmanagement, Leadership, Innovation & Produktlebenszyklus-Management.
Diplom bei Abschluss: Advanced Federal Diploma of Higher Education in Systems Engineering.

Berufslehre Konstrukteur EFZ **August 2014 – August 2018**
Ypsomed AG / Bernafon AG / Ammann Schweiz AG

Vierjährige Ausbildung in CAD-Konstruktion, Fertigungs- und Maschinentechnik, Steuerungs- und Elektrotechnik, technisches Englisch, Projektarbeit und überbetriebliche Kurse (z. B. Zeichnungs-, Produktions- und Automatisierungstechnik)

Diplom: Konstrukteur EFZ Eidgenössisches Fähigkeitszeugnis

Fachliche Kompetenzen

- Technisches Generalistenprofil mit betriebswirtschaftlichem Hintergrund (HF Systemtechnik)
- CAD / Konstruktion: Siemens NX, Kunststofftechnik, fertigungsgerechtes Design
- Dokumentation & Normen: ISO-normkonforme technische Doku, ECTR, SAP PLM
- Produktmanagement: Marktanalyse, Stakeholderkommunikation, Roadmapping
- Methoden & Tools: Toleranzberechnung, Verifikation, CAPA, Jira, Confluence
- Internationale Erfahrung in projekt- und kundenorientierten Umfeldern
- Kenntnisse regulierter Umgebungen (MedTech, GMP-nah)
- Klare und durchsetzungsfähige Kommunikation auf Deutsch und Englisch
- Hohes Verantwortungs- und Qualitätsbewusstsein, unternehmerisches Denken

Sprachen

Deutsch	Muttersprache
Englisch	C1 – Abgeschlossen an der TEKO

Besondere Leistungen

- Ypsomed Innovation Award 2024
- 3+ Patenteinreichungen in Technischem Bereich
- Erfolgreiche Lizenzierung technischer Entwicklung
- Fachlicher Wechsel vom Engineering ins Produktmanagement mit Fokus Medizintechnik

Referenzen

Gerne auf Anfrage.

Seite 2 / 2

3 Einleitung

3.1 Ausgangslage und Problemstellung

Spritzgusswerkzeuge gehören zu den teuersten Investitionsgütern in der Kunststoffverarbeitung. Während des Betriebs stehen für Spritzgusswerkzeuge je nach Maschinen- und Überwachungssystem Prozess- und Zustandsdaten zur Verfügung. Zustandsereignisse während Lagerung, Transport und Rüsten werden jedoch nicht bei jedem Werkzeug kontinuierlich und werkzeuggebunden dokumentiert.

In der Kunststoffverarbeitung stellen Spritzgusswerkzeuge hochkomplexe und kostenintensive Investitionsgüter dar, deren Anschaffungskosten im industriellen Umfeld regelmässig im sechsstelligen Frankenbereich liegen. Die Rentabilität dieser Werkzeuge hängt massgeblich von ihrer Verfügbarkeit und Lebensdauer ab. Die Werkzeugwartung erfolgt heute branchenüblich entweder reaktiv nach einem Defekt oder starr intervallbasiert nach einer definierten Anzahl produzierter Teile (Schuss).

Im typischen Einsatz verbleiben Spritzgusswerkzeuge über mehrere Wochen ununterbrochen auf der Spritzgussmaschine, bevor sie für Wartung, Produktwechsel oder Revision entfernt werden. Neben dem Produktionsprozess bestehen weitere relevante Schadensrisiken beim Lagern, Transportieren und Rüsten. Da Ereignisse in diesen Phasen häufig nicht mit einem werkzeuggebundenen Logger erfasst werden, ist die spätere Ursachenrekonstruktion erschwert.

Drei Schadensmechanismen sind dabei besonders relevant:

Korrosion im Lager: Werkzeugstähle sind nicht vollständig korrosionsbeständig. In nicht klimatisierten Hochregallagern kann Kondenswasser zu schweren Korrosionsschäden an den Kavitäten führen.

Transportschäden: Werkzeuge werden mit Kränen und Staplern bewegt. Harte mechanische Schocks, beispielsweise ein hartes Absetzen auf der Palette, können die feine Mechanik oder Heisskanalsysteme beschädigen.

Fehlbedienung im kalten Zustand: Das Betätigen von Nadelverschlussdüsen oder das gewaltsame Öffnen der Werkzeugtrennebene im nicht-aufgeheizten Zustand (Kaltstart) ist nach eigener Erfahrung eine häufige Ursache für teure Heisskanal- und Mechanikschäden.

Die in Kapitel 6.5 untersuchten Systeme für die Zustandsüberwachung im Spritzguss konzentrieren sich überwiegend auf die Überwachung des Schmelzeprozesses in der laufenden Maschine, beispielsweise durch Werkzeuginnendruckmessung. Diese Systeme analysieren den akuten Einspritzvorgang, sind in der Anschaffung jedoch zu kostspielig für eine flächendeckende Ausrüstung aller Werkzeuge eines Betriebs und sie liefern keine Daten, sobald das Werkzeug von der Maschine getrennt wird.

Es fehlt ein System, das mit einem Fitness-Tracker vergleichbar ist: ein kostengünstiger, dauerhaft am Werkzeug verbleibender Datenlogger, der den Zustand und die Umgebungsbedingungen des Werkzeugs in allen Betriebsphasen aufzeichnet. Das System verbessert weder Verfügbarkeit noch Lebensdauer direkt, das kann es nicht. Was es tut: es macht den Zustand des Werkzeugs über alle Betriebsphasen transparent und ermöglicht bei Schäden eine datenbasierte Ursachenrekonstruktion. Ohne ein solches System bleiben Garantie- und Wartungsfälle auf Vermutungen angewiesen.

Die Bezeichnung «Fitness-Tracker» wurde bewusst gewählt. Sie ist das zentrale Kommunikationsmittel gegenüber der Zielgruppe. Werkzeugmacher und Einrichter verstehen «Fitness-Tracker», nicht «Edge-basiertes Condition-Monitoring-System mit eventbasierter Speicherarchitektur».

3.2 Grundannahmen

Der Arbeit liegen zwei Annahmen aus meiner Berufserfahrung zugrunde, die sämtliche Konzeptentscheide prägen.

Annahme 1: Benutzerfreundlichkeit entscheidet über den Einsatz.
Ein System, dessen Bedienung vom Anwender nicht ohne elektrotechnische oder IT-Vorkenntnisse beherrscht wird, wird im Betrieb nicht verwendet, unabhängig von seiner technischen Qualität.

Annahme 2: Der Preis entscheidet über die Verbreitung.
Bestehende Systeme scheitern in kleineren Betrieben an den Anschaffungskosten. Ein Nutzen entsteht nur, wenn das Gerät in einer Grössenordnung liegt, die ohne Investitionsantrag beschafft werden kann.

Beide Annahmen dienen als überprüfbare Entwurfshypothesen. Die Auswertung der zwölf Stelleninserate in Kapitel 6.6 untersucht, welche Kompetenzen in der betrachteten Stichprobe ausdrücklich verlangt werden. Die Gewichtung in Kapitel 7.2 legt die Prioritäten des Verfassers für die Variantenentscheide offen. Eine repräsentative Bestätigung des Marktverhaltens leisten diese Methoden nicht; erste praktische Hinweise zur Bedienbarkeit liefert der spätere Anwender-/Bedientest.

3.3 Zielsetzung

Es wird ein funktionsfähiger Prototyp (Proof of Concept) für ein kostengünstiges Condition-Monitoring-System für Spritzgusswerkzeuge konzipiert und aufgebaut. Das System besteht aus einem kompakten, autarken Sensor-Modul, welches dauerhaft am Werkzeug verbleibt. Der Prototyp soll die im Pflichtenheft definierten Klima-, Schock-, Zyklus- und Zustandsinformationen zeit- bzw. ereignisabhängig erfassen und lokal speichern. Aus dem jeweils erfassten Informationsumfang ergibt sich ausdrücklich keine vollständige physikalische Überwachung sämtlicher möglicher Werkzeugschäden. Das Modul erfasst die spezifizierten Zustandswechsel, Zyklen und Ereignisse im Rahmen der definierten Messintervalle und Betriebsbedingungen in allen Betriebsphasen: Produktion, Rüsten, Transport und Lagerung. Im Deep Sleep können einzelne digitale Schaltvorgänge nicht aufgezeichnet werden; diese Grenze ist in Kapitel 11.8 beschrieben.

Das Sensor-Modul arbeitet als eigenständiges Edge-Device. Ein Backend-System gehört nicht zum Lieferumfang. Die dokumentierte HTTP/JSON-Schnittstelle ermöglicht grundsätzlich die Integration in geeignete eigene Systeme; die Anpassung an deren Sicherheits- und Datenformate liegt beim Integrator. Der Grund für diese Entscheidung ist ein praktischer: In regulierten Umgebungen wie der Medizintechnik unterliegt das Senden von Produktionsdaten an eine externe Cloud strengen IT-Vorgaben. Der Verzicht auf eine Cloud-Anbindung reduziert externe Datenübertragungen, ersetzt aber keine betriebliche IT-Sicherheitsprüfung. Das System muss ohne Internetverbindung funktionieren.

Das Materialbudget für den Prototyp beträgt CHF 300.-. Dieser Betrag ist kein Kompromiss, sondern ein bewusstes Entwurfskriterium: Das System soll so günstig sein, dass eine flächendeckende Ausrüstung aller Werkzeuge eines Betriebs wirtschaftlich darstellbar ist.

Die erarbeiteten Ergebnisse, Hardware-Design, Firmware und Dokumentation, werden kostenfrei öffentlich zugänglich gemacht, um die Nachnutzung durch Dritte zu ermöglichen. Die geeignete Lizenz wird im Rahmen der Arbeit bestimmt.

Die vollständige Aufgabenstellung mit allen Muss-Zielen (M1-M7) und Kann-Zielen (K1-K4) ist in Anhang A (Themeneingabe) dokumentiert.

3.4 Abgrenzung

Folgende Punkte sind explizit nicht Bestandteil dieser Arbeit:

Keine Prozessregelung: Das System dient ausschliesslich der Zustandsüberwachung. Die Erfassung prozesskritischer Schmelzeparameter wie Werkzeuginnendruck ist explizit ausgeschlossen.

Passives System: Es erfolgt keinerlei signaltechnischer Eingriff in die Steuerung der Spritzgussmaschine.

Kein Backend-System im Lieferumfang: Das Sensor-Modul ist als autarkes Edge-Device konzipiert. Ein Backend-System (Datenbank, Dashboard, TIG-Stack) wird nicht als Lieferobjekt bereitgestellt. Die Schnittstellenspezifikation ermöglicht dem Anwender eine eigenständige Integration. Diese Entscheidung ist nicht technischer Bequemlichkeit geschuldet, sondern der Realität in regulierten Produktionsumgebungen: In Medtech-Unternehmen ist die Anbindung an eine Cloud nach eigener Erfahrung an aufwändige IT-Security-Freigaben gebunden.

Kein Industriegehäuse: Die Entwicklung eines industrietauglichen, spritzwassergeschützten und zertifizierten Gehäuses ist nicht Bestandteil des Proof of Concepts.

Einzelmodul-Konzept: Die Überwachung beschränkt sich auf eine Werkzeughälfte. Eine informationstechnische Synchronisation mehrerer verteilter Module am selben Werkzeug wird nicht umgesetzt.

3.5 Vorgehensmethodik

Für dieses Projekt wird das Basis-Phasenkonzept gemäss «Projektmanagement für Führungsfachleute» gewählt. Dieses Lehrmittel ist eines der verwendeten Lehrmittel im Fach Projektmanagement der TEKO und bietet branchenübliche Bearbeitungsmechanismen. Das Basisphasenkonzept bietet die in einem Projekt mit dieser Grössenordnung die wichtigen Vorteile: «Top-Down (vom Groben ins Detail), Phasenweises Vorgehen, Bewusstes Trennen der Planung, Realisierung, Einführung und Erhaltung.» (Führer & Züger, 2024, S. 23)

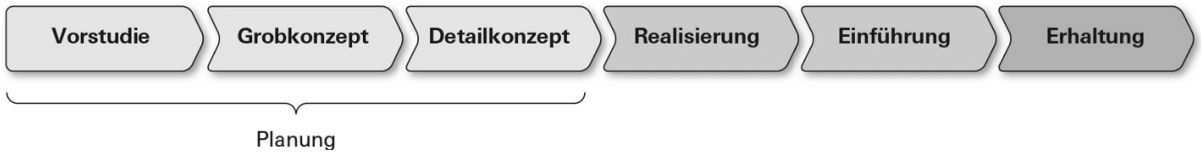


Abbildung 1 - Basis-Phasenkonzept (Quelle: Führer & Züger, 2024, S. 23)

Das Projekt erfordert sowohl eine Konzeptphase (Grundlagen, Marktanalyse, Bewertungen) als auch eine Realisierungsphase (Hardware, Firmware, Test). Die Phasen bauen aufeinander auf. Ein paralleles Arbeiten an Vorgängen ist nur innerhalb derselben Phase möglich. Dieses sequentielle Vorgehen entspricht dem klassischen Projektmanagement und passt zur Natur eines Hardware-Projekts, bei dem eine gedruckte Leiterplatte nicht «iteriert» werden kann wie eine Software.

Die Zuordnung der Arbeitspakete zu den Phasen:

Phase	Arbeitspakete
Vorstudie	Grundlagen, Marktanalyse, Risikoanalyse, Projektplanung
Grobkonzept	Pflichtenheft, Bewertungsmethodik, Systemarchitektur, Komponentenwahl
Detailkonzept	Sensorik, Schnittstellen und Verkabelung, Speicherarchitektur, Energieversorgung, Bedienkonzept, Schaltungsentwurf
Realisierung	Breadboard-Test, Schwellenwertversuche, PCB-Layout, Gehäuse-CAD, Firmware, Montage, Funktionstests, Schnittstellenspezifikation, Stückliste
Einführung	Anforderungsprüfung, Präsentation
Erhaltung	Reflexion, Fazit und Lessons Learned

Für diese Diplomarbeit wird ein Vorgehen gemäss der Stacey Matrix (Führer & Züger, 2024) *Buch Seite 30* gewählt.

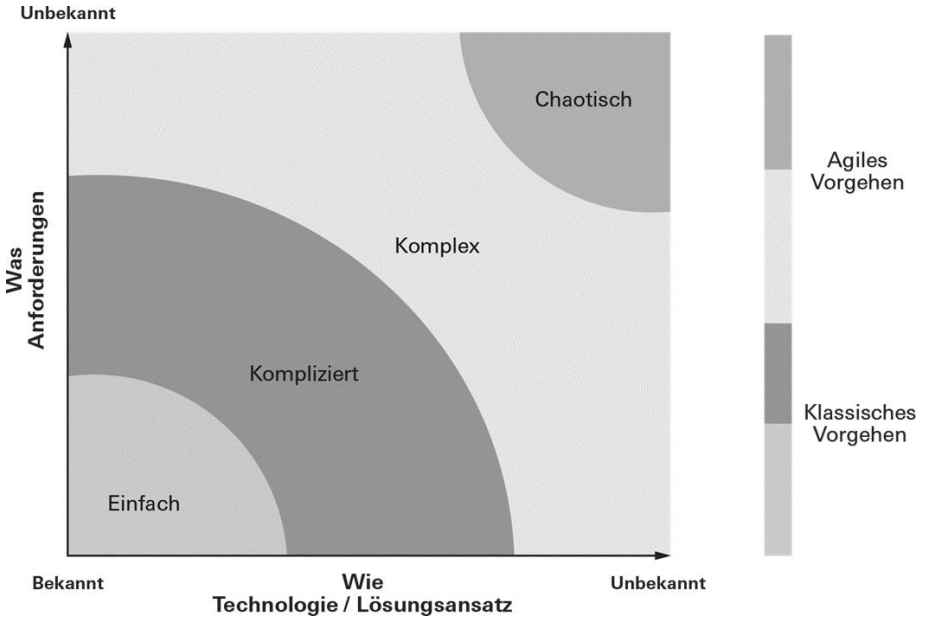


Abbildung 2 - Stacey Matrix (Quelle: Führer & Züger, 2024, S. 30, schwarzweiss angepasst)

3.6 Risikoanalyse

Da das klassische Projektmanagement-Vorgehen gewählt wurde, ist es sinnvoll die Risiken frühzeitig zu identifizieren und zu bewerten. Die Risikoanalyse beeinflusst direkt die Projektplanung. Puffer und Meilensteine sind auf die identifizierten Risiken abgestimmt.

3.6.1 Risiko Management Formular (vereinfachte Version)

Die Wahrscheinlichkeit und Tragweite werden jeweils mit einem Wert von 1 - 10 bewertet. Dabei bedeutet ein niedriger Wert eine niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. eine niedrige Tragweite. Diese Systematik ist angelehnt an das Risikomanagement-Formular aus Projektmanagement für Führungsfachleute (Führer & Züger, 2024, S. 91, Abb. 16-5)

Tabelle 1 - Risiko Management Formular (eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 191)

ID	Bezeichnung	Risiko	Wahrscheinlichkeit	Tragweite	Massnahmen
R1	PCB-Fehler	Der erste PCB enthält einen Layout- oder Schaltungsfehler und muss neu bestellt werden.	6	8	Breadboard-Test vor Design Freeze. DFM-Prüfung vor Bestellung. Puffer 2 (zwei Wochen) für Respin eingeplant. Software-Entwicklung läuft auf Breadboard weiter.
R2	Lieferverzögerung	Komponenten oder PCB treffen später ein als geplant. Der kritische Pfad verschiebt sich.	5	8	Bestellung bei Schweizer Händlern wo möglich (Bastelgarage, Distrelec). PCB-Bestellung früh im Plan. Kritische Komponenten doppelt bestellen.
R3	Display-Integration	Das Display lässt sich nicht stabil in die Firmware integrieren.	7	5	Display-Typ mit stabiler Library wählen. Früh testen im Breadboard-Aufbau.
R4	Sensor ungeeignet	Ein gewählter Sensor liefert unplausible Werte oder erfüllt die Anforderung nicht (z.B. Beschleunigungssensor zu unempfindlich für Schockerkennung).	5	6	Sensorik im Breadboard-Test vor Design Freeze validieren.
R5	Speicherkapazität unter 48h	Die berechnete Speicherkapazität erreicht die geforderten 48 Stunden nicht (Muss-Ziel M5).	3	9	Berechnung früh im Konzept durchführen. Ereignisrate und Datensatzgrösse konservativ annehmen.
R6	Schwellenwerte nicht bestimmbar	Die Schwellenwerte für Schock und Kondensation lassen sich experimentell nicht sauber herleiten.	4	6	Schwellenwert konfigurierbar machen, damit Anwender nachjustieren kann.

ID	Bezeichnung	Risiko	Wahrscheinlichkeit	Tragweite	Massnahmen
R7	Zeitüberschreitung	Der Aufwand übersteigt die geplanten Stunden. Die Abgabe ist gefährdet.	6	7	Wöchentliche Soll-Ist-Kontrolle im Terminplan. Kann-Ziele (W-Anforderungen) bei Zeitdruck als erstes streichen.
R8	Gehäuse passt nicht	3D-gedrucktes Gehäuse passt nicht zum PCB (Toleranzen, Verzug, falsche Masse).	5	3	CAD-Modell von PCB und Gehäuse gemeinsam prüfen (verheiraten). Toleranzen für FDM-Druck einplanen. Gehäuse ist nicht Teil des Design Freeze und kann nachgedruckt werden.
R9	Budgetüberschreitung	Die Materialkosten übersteigen CHF 300.	4	3	Stückliste mit Preisen führen. Bei Neubestellung oder Doppelbestellung Kosten dokumentieren und begründen.

Selbst bei sorgfältiger Bearbeitung bleibt ein Restrisiko zu vergessenen Punkten. Sollten sich im Projektverlauf weitere Risiken ergeben werden diese mit einem Nachtrag versehen und ebenfalls dokumentiert.

3.6.2 Risikoportfolio

Eine einfache Möglichkeit um die Risiken übersichtlich und nachvollziehbar dokumentieren und bearbeiten zu können bietet das nachfolgende Diagramm Risikoportfolio.. In diesem werden die vorher genannten Risiken in X-Richtung der Tragweite und in Y-Richtung der Eintrittswahrscheinlichkeit gegliedert. Desto dunkler die Tönung umso wichtiger wird es das Risiko mit Massnahmen zu bearbeiten.

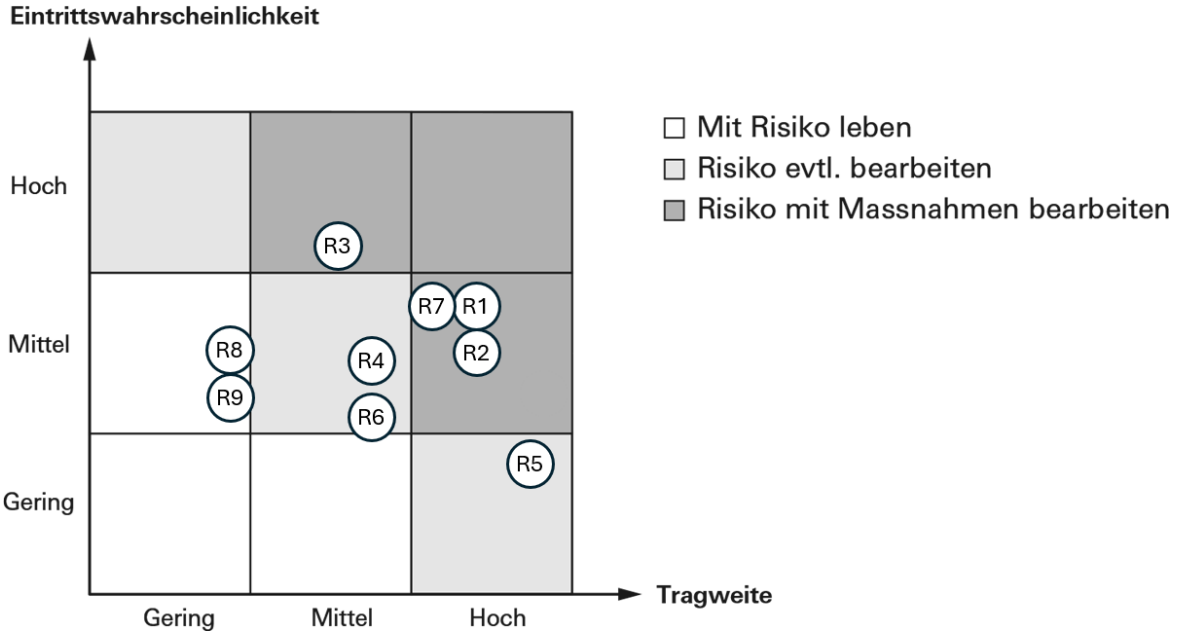


Abbildung 3 - Risikoportfolio (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 189)

3.6.3 Analyse der Risikobewertung und Präventionsmassnahmen

Folgende Risiken müssen in der Diplomarbeit aktiv bearbeitet werden:

Risiko	Begründung
R1	Eine PCB-Neubestellung kostet zwei Wochen. Ohne Breadboard-Test und ohne Puffer ist die Abgabe direkt gefährdet. Der Breadboard-Test ist deshalb ein eigener Meilenstein.
R2	Die Komponentenbestellung und die PCB-Bestellung liegen auf dem kritischen Pfad. Jede Verzögerung wandert eins zu eins auf die Abgabe. Frühe Bestellung und lokale Lieferanten (wo verfügbar) sind die einzigen Hebel.
R3	Die Erfahrung aus der Transferarbeit im Fach Mikrocontroller zeigt, dass Display-Integration ein reales Problem sein kann. Es hat dort viele Stunden gekostet. Diesmal wird das Display bewusst einfach angebunden und früh getestet.
R5	Wird die 48h-Grenze nicht erreicht, ist das Muss Ziel nicht erfüllt. Die Berechnung muss früh im Konzept stehen, damit die Speicherwahl noch angepasst werden kann. Bei Abweichung frühzeitige Dokumentation.
R7	200 Stunden in acht Wochen neben Beruf und Branchenwechsel. Die wöchentliche Soll-Ist-Kontrolle ist der Frühwarnmechanismus. Die Kann-Ziele sind die Reserve.

Folgende Risiken werden beobachtet, aber nicht aktiv bearbeitet

Risiko	Begründung
R4	Wird durch den Breadboard-Test automatisch abgedeckt. Fällt ein Sensor durch, wird aus der Variantenbewertung der nächste gewählt.
R6	Schwellenwerte werden konfigurierbar gebaut. Auch ein nicht perfekt hergeleiteter Wert erfüllt die Anforderung, solange die Herleitung dokumentiert und begründet ist.
R8	Gehäuse ist nicht Teil des Design Freeze. Ein Nachdruck kostet wenige Stunden.

Folgende Risiken dürfen in der Diplomarbeit vernachlässigt werden

Risiko	Begründung
R9	Budget ist ein Wunschziel. Eine begründete Überschreitung ist dokumentierbar und kein Ausschlusskriterium.

3.7 Projektstrukturplan

Der Projektstrukturplan zeigt die Zuordnung aller Arbeitspakete zu den sechs Phasen des Basis-Phasenkonzepts. Die Detailplanung mit Terminen, Abhängigkeiten und Meilensteinen folgt im Kapitel Projektplanung.

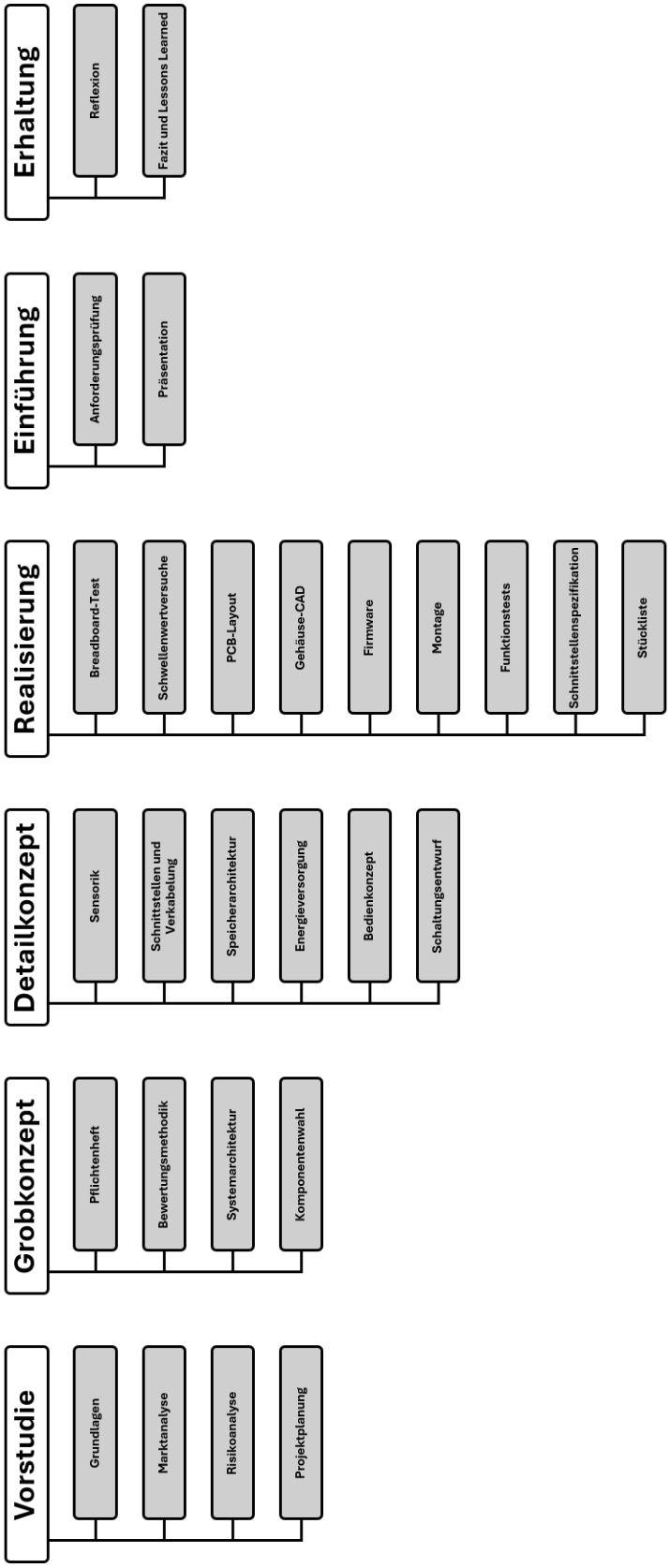


Abbildung 4 - Projektstrukturplan (Quelle: Eigene Darstellung)

4 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist Anhang A (Themeneingabe) dieser Diplomarbeit. Diese wird hier nicht erneut aufgelistet. Das nachfolgende Pflichtenheft enthält die daraus abgeleiteten, konsolidierten Anforderungen.

4.1 Pflichtenheft

Aus der Aufgabenstellung werden im Folgenden die konkreten Anforderungen an das zu entwickelnde System abgeleitet und in eine verbindliche Form gebracht. Explizit gilt für diese Arbeit dass das Pflichtenheft die oberste Definition der Vorgaben ist. Änderungen am Umfang sind üblicherweise nur mit einem Änderungsantrag möglich und haben Einfluss auf Termin und Kosten. Abweichungen vom Pflichtenheft werden im Projektverlauf dokumentiert und in der Anforderungsprüfung als erfüllt, teilweise erfüllt, geändert oder nicht erfüllt bewertet. Auch bei einem selbst initiierten Projekt sind Soll-Anforderung und realisierte Funktion ausdrücklich voneinander zu unterscheiden.

Projektdaten

Angabe	Wert
Projekt	Condition-Monitoring-System für Spritzgusswerkzeuge
Projektmanager	Arjen Hoti
Projektart	Proof of Concept mit Hardware und Firmware
Fachexperte	Marc Bauhofer, Technology & Innovation Manager, Flex
Projektbeginn	04. September 2026
Projektende	02. November 2026, 17:00 Uhr
Präsentation	13./14. November 2026
Bearbeitungszeit	ca. 150-250 Stunden
Budget	CHF 300.- (Materialkosten Prototyp)

Legende

Typ F = Festanforderung (muss erfüllt sein, damit das Projekt als erfolgreich gilt)
Typ W = Wunschanforderung (soll wenn möglich erfüllt werden)
Gewichtung (nur bei Typ W): 1 = Niedrige Priorität, 2 = Mittlere Priorität, 3 = Hohe Priorität

Anforderungen und Wünsche

1. Sensorik und Messung			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
F01	Das Sensor-Modul erfasst Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Werkzeugumgebung. Die geeigneten Messintervalle für die Betriebsphasen Produktion, Lagerung und Transport werden ermittelt, begründet und dokumentiert.	F	
F02	Das Sensor-Modul erkennt harte mechanische Schocks und protokolliert diese als Ereignis mit Zeitstempel. Der Schwellenwert für die Schockerkennung wird definiert und begründet.	F	
F03	Das System berechnet aus Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit den Taupunkt. Unterschreitet die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Taupunkt einen definierten Schwellenwert, wird dies als Kondensationsrisiko-Ereignis mit Zeitstempel protokolliert. Der Schwellenwert wird ermittelt und begründet.	F	
F04	Das Sensor-Modul erkennt über konfigurierbare digitale Eingänge Werkzeugbewegungen (Schliesszyklus) und protokolliert daraus Produktionsblöcke (Start/Stopp) sowie Zykluszeiten mit Zeitstempel.	F	
2. Speicher und Daten			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**

F05	Ein Konzept für die eventbasierte Speicherarchitektur (Ereignistypen, Datensatzstruktur, Speichermanagement) wird definiert. Die erreichbare Speicherkapazität wird in Betriebstagen unter dokumentierten Annahmen berechnet. Mindestens 48 Stunden rückwirkend verfügbare Daten sind sichergestellt.	F	
F06	Eine Schnittstellenspezifikation für die Datenausgabe wird erarbeitet. Diese definiert Protokoll, Datenformat und Nachrichtenstruktur so, dass Dritte eine Backend-Anbindung realisieren können.	F	
W01	Gespeicherte Mess- und Ereignisdaten können als CSV-Datei exportiert werden.	W	1

3. Bedienung und Inbetriebnahme			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
F07	Die Inbetriebnahme und Konfiguration erfolgt über das integrierte Display. Anwender aus dem Werkzeugbau- und Produktionsumfeld (Werkzeugmacher, Einrichter) können das System ohne IT-Kenntnisse oder externe Hilfsmittel eigenständig einrichten. Die Konfigurationsparameter und der Inbetriebnahmeablauf werden definiert und dokumentiert. Ein Smartphone welches zum einrichten verwendet wird oder ein Laptop sind beides erlaubte Betriebsmittel im sinne dieser Arbeit.	F	
W02	Die Bedienoberfläche verwendet eindeutige, im Werkzeugbau geläufige Begriffe. Keine Fachbegriffe aus der Informatik.	W	3

4. Kommunikation			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
W03	Das Sensor-Modul übermittelt in begründeten Abständen Messdaten und Ereignisse an ein externes Backend-System.	W	1
W04	Falls WiFi-Konfiguration erforderlich ist, erfolgt diese über ein Captive Portal (automatische Weiterleitung, keine manuelle IP-Eingabe).	W	1

5. Energieversorgung			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
F08	Das Sensor-Modul ist im Produktionsbetrieb kabelgebunden mit Energie versorgt.	F	
W05	Das Sensor-Modul verfügt über einen integrierten Akkubetrieb für unterbrechungsfreie Überwachung während Transport, Rüsten und Lagerung. Die maximal mögliche Akkubetriebsdauer wird berechnet.	W	3
W06	Ein akustisches Signal warnt, wenn ein Werkzeug eingelagert wird, ohne dass eine dauerhafte Energieversorgung sichergestellt ist.	W	3

6. Hardware und Konstruktion			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
W07	Die Gesamtkosten des Prototyps (Material) überschreiten CHF 300.- nicht.	W	3
W08	Alle Steckverbindungen sind so ausgeführt, dass ein Vertauschen oder Verdrehen der Anschlüsse mechanisch ausgeschlossen oder maximal minimiert ist.	W	2
W09	Das System verwendet ausschliesslich Komponenten, die ohne Spezialbezugsquellen beschafft werden können. Gängige Lieferanten bei denen auch als Privatperson bestellt werden kann sollen bevorzugt werden.	W	2
W10	Vorkonfektionierte Kabel werden bevorzugt.	W	2

7. Systemkonzept			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**

F09	Das Sensor-Modul arbeitet als eigenständiges Edge-Device. Es besteht keine Abhängigkeit von einer Cloud, einem Backend oder einer Internetverbindung für den Grundbetrieb.	F	
F10	Das System dient ausschliesslich der Zustandsüberwachung. Kein Eingriff in die Maschinensteuerung, keine Prozessregelung, kein Erfassen von Schmelzeparametern.	F	
F11	Die Überwachung beschränkt sich auf eine Werkzeughälfte (Einzelmodul-Konzept).	F	

8. Dokumentation und Nachnutzung			
Nr.	**Anforderung / Wunsch**	**Typ**	**Gewichtung**
F12	Die erarbeiteten Ergebnisse (Hardware-Design, Firmware, Dokumentation) werden kostenfrei öffentlich zugänglich gemacht. Die geeignete Lizenz wird im Rahmen der Arbeit bestimmt.	F	
F13	Die Dokumentation ist so aufgebaut, dass ein Dritter das System nachbauen kann (Stückliste, Schaltplan, Firmware, Aufbauanleitung).	F	

9. Abgrenzung

Folgende Punkte sind explizit nicht Bestandteil des Projekts:

- Kein industrietaugliches, spritzwassergeschütztes oder zertifiziertes Gehäuse
- Kein Backend-System (Datenbank, Dashboard, TIG-Stack). Die Schnittstellenspezifikation ermöglicht die eigenständige Integration durch den Anwender
- Keine Synchronisation mehrerer Module am selben Werkzeug
- Keine Erfassung prozesskritischer Schmelzeparameter (z.B. Werkzeuginnendruck)
- Kein signaltechnischer Eingriff in die Steuerung der Spritzgussmaschine

10. Entscheidung Pflichtenheft

Da dieses Projekt durch den Projektleiter und Auftraggeber eingegeben wird genügt eine Unterschrift.

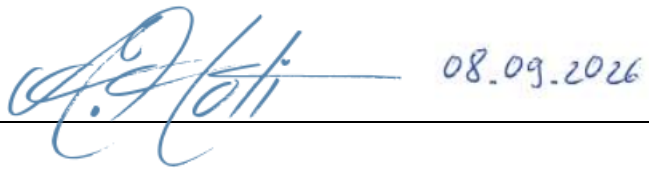
☒ Pflichtenheft wird freigegeben

☐ Das Pflichtenheft soll überarbeitet werden. Änderungen:

☐ Das Pflichtenheft wird abgelehnt. Begründung:

Unterschrift Auftraggeber / Projektleiter und Datum

Arjen Hoti



5 Projektplanung

Die Umsetzung der formulierten Anforderungen erfordert eine strukturierte Planung. Bevor mit der inhaltlichen Arbeit begonnen wird, werden Risiken identifiziert, Arbeitspakete definiert und ein realistischer Terminplan aufgestellt. In diesem Projekt wurde die Risikoanalyse vor die Erstellung des Pflichtenheftes gezogen, um sicherzustellen dass einerseits das Pflichtenheft die vorhandenen Risiken abdeckt und andererseits gezielt auf diese in der Planung eingehen zu können.

5.1 Terminplan und Meilensteine

Für eine Lesbare Ansicht Anhang E öffnen.

Nr	Phase	Arbeitspaket	Soll Start	Soll Ende	Soll (h)	Ist Start	Ist Ende	Ist (h)	Abw. (h)	Vorgänger	Meilenstein
1	Grobkonzept	Pflichtenheft finalisieren	04.09.2026	08.09.2026	4	07.09.2026	08.09.2026	2.57	-1	—	**MS1: Freigabe Pflichtenheft**
2	Vorstudie	Projektplanung: PSP, Terminplan, Risikoanalyse, kritischer Pfad	08.09.2026	09.09.2026	6	08.09.2026	09.09.2026	2.17	-4	1	**MS2: Planung abgeschlossen**
3	Vorstudie	Grundlagen: Betriebsphasen, Schadensmechanismen, Taupunkt	09.09.2026	11.09.2026	10	09.09.2026	12.09.2026	14.5	+5	2	
4	Vorstudie	Marktanalyse bestehender Systeme	10.09.2026	11.09.2026	5	11.09.2026	11.09.2026	1.5	-4	2	
5	Grobkonzept	Bewertungsmethodik: Merkmale, Paarvergleich, Gewichtung	11.09.2026	12.09.2026	6	12.09.2026	12.09.2026	3.84	-2	3, 4	**MS3: Bewertungsmethodik freigegeben**
6	Grobkonzept	Systemkonzept: Architektur, Hardwareplattform, Sensorik	12.09.2026	13.09.2026	12	13.09.2026	19.09.2026	11.41	-1	5	
7	Grobkonzept	Komponenten auswählen und bestellen	13.09.2026	13.09.2026	2	14.09.2026	14.09.2026	2.44	+0	6	
8	Detailkonzept	Systemkonzept: Schnittstellen, Kommunikation, Speicher, Energie	13.09.2026	15.09.2026	12	14.09.2026	22.09.2026	16.31	+4	6	
9	Realisierung	Lieferzeit Komponenten	13.09.2026	15.09.2026	0	14.09.2026	16.09.2026	0	0	7	
10	Detailkonzept	Schaltung schematisch entwerfen	14.09.2026	15.09.2026	6	15.09.2026	19.09.2026	6.2	+0	8	
11	Realisierung	Breadboard-Test: Verkabelung, Komponenten-Interaktion	15.09.2026	16.09.2026	8	15.09.2026	17.09.2026	4.8	-3	9, 10	**MS4: Komponententest erfolgreich (MVP)**
12	Realisierung	Versuche Schwellenwerte: Schock, Kondensation	16.09.2026	17.09.2026	6	19.09.2026	19.09.2026	8.12	+2	11	**MS5: Schwellenwerte definiert**
13	Detailkonzept	Pinbelegung Mikrocontroller festlegen	16.09.2026	16.09.2026	2	15.09.2026	15.09.2026	1.44	-1	11	**MS6: Pinbelegung gefreezt**
14	Realisierung	CAD: PCB-Layout erstellen	16.09.2026	17.09.2026	15	16.09.2026	19.09.2026	12.41	-3	13	
15	Realisierung	CAD: Gehäuse erstellen und mit PCB verheiraten	17.09.2026	18.09.2026	10	16.09.2026	23.09.2026	18.66	+9	14	
16	Realisierung	Design Freeze PCB	18.09.2026	18.09.2026	1	19.09.2026	19.09.2026	0.2	-1	14, 15	**MS7: Design Freeze PCB**
17	Realisierung	PCB-DFM-Prüfung	18.09.2026	18.09.2026	1	19.09.2026	19.09.2026	0.2	-1	16	**MS8: PCB-DFM bestanden**
18	Realisierung	PCB bestellen	18.09.2026	18.09.2026	1	20.09.2026	20.09.2026	0.4	-1	17	**MS9: PCB bestellt**
19	Realisierung	Lieferzeit PCB	18.09.2026	28.09.2026	0	20.09.2026	28.09.2026	0	0	18	
20	Detailkonzept	Bedienkonzept: Zielgruppe, Abläufe, Menüstruktur	19.09.2026	22.09.2026	10	12.09.2026	01.10.2026	12	+2	8	
21	Realisierung	Software: Architektur, Sensorerfassung, Ereigniserkennung	20.09.2026	27.09.2026	20	19.09.2026	26.09.2026	19.44	-1	11, 12, 20	
22	Realisierung	Software: Speichermanagement, Display, Bedienung	25.09.2026	02.10.2026	18	26.09.2026	19.09.2026	16.52	-1	21	
23	Realisierung	Gehäuseteile 3D-drucken	22.09.2026	25.09.2026	3	26.09.2026	30.09.2026	2.67	-0	15	
24	Realisierung	Montage Gesamtsystem	28.09.2026	30.09.2026	6	30.09.2026	30.09.2026	10.83	+5	19, 23	**MS10: Montage mechanisch erfolgreich**
25	Realisierung	Elektrische Funktionsprüfung PCB	30.09.2026	01.10.2026	3	01.10.2026	03.10.2026	7.16	+4	24	**MS11: Funktion elektrisch erfolgreich**
26	Realisierung	Software auf Zielsystem aufspielen und integrieren	02.10.2026	05.10.2026	8	03.10.2026	03.10.2026	6.12	-2	22, 25	
27	Realisierung	Funktionstests gegen Pflichtenheft	05.10.2026	09.10.2026	12	05.10.2026	09.10.2026	4.55	-7	26	**MS12: Software erfüllt Anforderungen**
28	Realisierung	Schnittstellenspezifikation finalisieren	09.10.2026	11.10.2026	4	01.10.2026	02.10.2026	3.2	-1	27	**MS13: Schnittstellendokument finalisiert**
29	Realisierung	Stückliste mit Kosten finalisieren	09.10.2026	10.10.2026	2	10.10.2026	10.10.2026	1.48	-1	24	
30	Puffer	Puffer 2: PCB-Respin	11.10.2026	24.10.2026	0					25	
31	Einführung	Überprüfung Anforderungen: Ziele, Pflichtenheft, Zeit Soll/Ist	25.10.2026	27.10.2026	4	10.10.2026	11.10.2026	9.47	+5	27, 28, 29	
32	Erhaltung	Reflexion, Lessons Learned, Fazit, Management Summary	27.10.2026	29.10.2026	6	26.10.2026	28.10.2026	7.13	+1	31	
33	Puffer	Ungeplantes	29.10.2026	01.11.2026	0			12.4	+12	32	
34	Einführung	Abgabe	02.11.2026	02.11.2026	1	02.11.2026	02.11.2026	1.24	+0	33	**MS14: Abgabe**
35	Einführung	Präsentationsvorbereitung	03.11.2026	12.11.2026	10			8.14	-2	34	
36	Einführung	Präsentation	13.11.2026	14.11.2026	2			0.2	-2	35	**MS15: Abschluss**
		Total			**216**			**229.72**	**+14**		

Der Terminplan gliedert die 216 geplanten Sollstunden auf den Zeitraum vom 04. September bis 02. November 2026.

5.2 Meilensteine

Die folgende Tabelle fasst die Meilensteine zusammen:

MS	Bezeichnung	Soll Datum
MS1	Freigabe Pflichtenheft	08.09.2026
MS2	Planung abgeschlossen	09.09.2026
MS3	Bewertungsmethodik freigegeben	12.09.2026
MS4	Komponententest erfolgreich (MVP)	16.09.2026
MS5	Schwellenwerte definiert	17.09.2026
MS6	Pinbelegung gefreezt	16.09.2026
MS7	Design Freeze PCB	18.09.2026
MS8	PCB-DFM bestanden	18.09.2026
MS9	PCB bestellt	18.09.2026
MS10	Montage mechanisch erfolgreich	30.09.2026
MS11	Funktion elektrisch erfolgreich	01.10.2026
MS12	Software erfüllt Anforderungen	09.10.2026
MS13	Schnittstellendokument finalisiert	11.10.2026
MS14	Abgabe	02.11.2026
MS15	Abschluss	14.11.2026

5.3 Kritischer Pfad

Der kritische Pfad verläuft über die Kette: Komponentenbestellung → Breadboard-Test → Pinbelegung → PCB-Layout → Design Freeze → PCB-Bestellung → Lieferzeit → Montage → Funktionsprüfung → Software-Integration → Funktionstests → Abgabe.

Jede Verzögerung in dieser Kette verschiebt die Abgabe eins zu eins. Der grösste Einzelblock ist die PCB-Lieferzeit (ca. 10 Tage), die nicht beeinflussbar ist. Deshalb liegt die PCB-Bestellung bewusst früh im Plan (18.09.2026).

Puffer 2 (11.-24.10.2026) fängt eine allfällige PCB-Neubestellung ab. Falls die elektrische Funktionsprüfung (MS11) fehlschlägt, kann innerhalb dieses Puffers ein neuer PCB bestellt und geliefert werden. Die Software-Entwicklung läuft währenddessen auf dem Breadboard-Aufbau weiter.

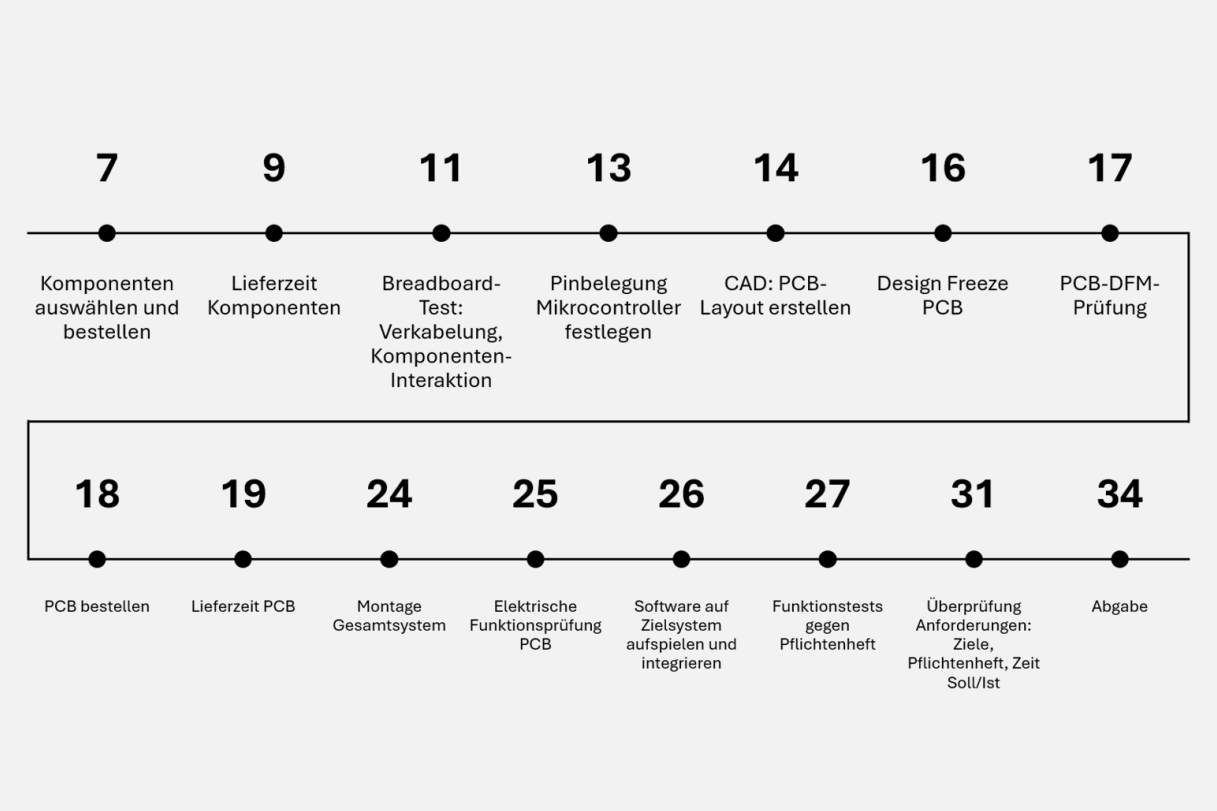


Abbildung 5 - Kritischer Pfad, eigene Visualisierung (Quelle: Eigene Darstellung)

6 Grundlagen

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die fachlichen Grundlagen, auf denen alle Entwurfsentscheide dieser Arbeit aufbauen. Sie richten sich sowohl an Leser mit Spritzguss-Hintergrund, die den Einstieg in die Sensorik beabsichtigen, als auch an technische Leser, die den industriellen Kontext verstehen müssen.

6.1 Was ist ein Spritzgiesswerkzeug?

Im Spritzgiessverfahren wird geschmolzener Kunststoff, meist unter hohem Druck, in eine Form (typischerweise aus Stahl) eingespritzt, kühlt dort ab und wird als fertiges Kunststoffteil entnommen. Diese Stahlform wird als Spritzgusswerkzeug bezeichnet.

6.1.1 Aufbau

Ein Spritzgusswerkzeug besteht typischerweise aus zwei Hälften: Die Düsenseite (im englischen Fixed Half, fixierte hälfte) und der Auswerferseite (im englischen Moving Half, bewegliche Seite) die in der Spritzgussmaschine auseinandergefahren werden um den Spritzling freizugeben.
Im Inneren befindet sich die Kavität: der formgebende Hohlraum, der die Geometrie des Kunststoffteils (Spritzling) abbildet. Je nach Komplexität des Werkzeugs kommen weitere Komponenten hinzu: Schieber für Hinterschneidungen, Kühlkanäle für die Temperierung, Auswerferstifte für die Entformung und bei vielen Werkzeugen ein Heisskanalsystem (im englischen Hot-Runner), das den Kunststoff bis zur Kavität flüssig hält.

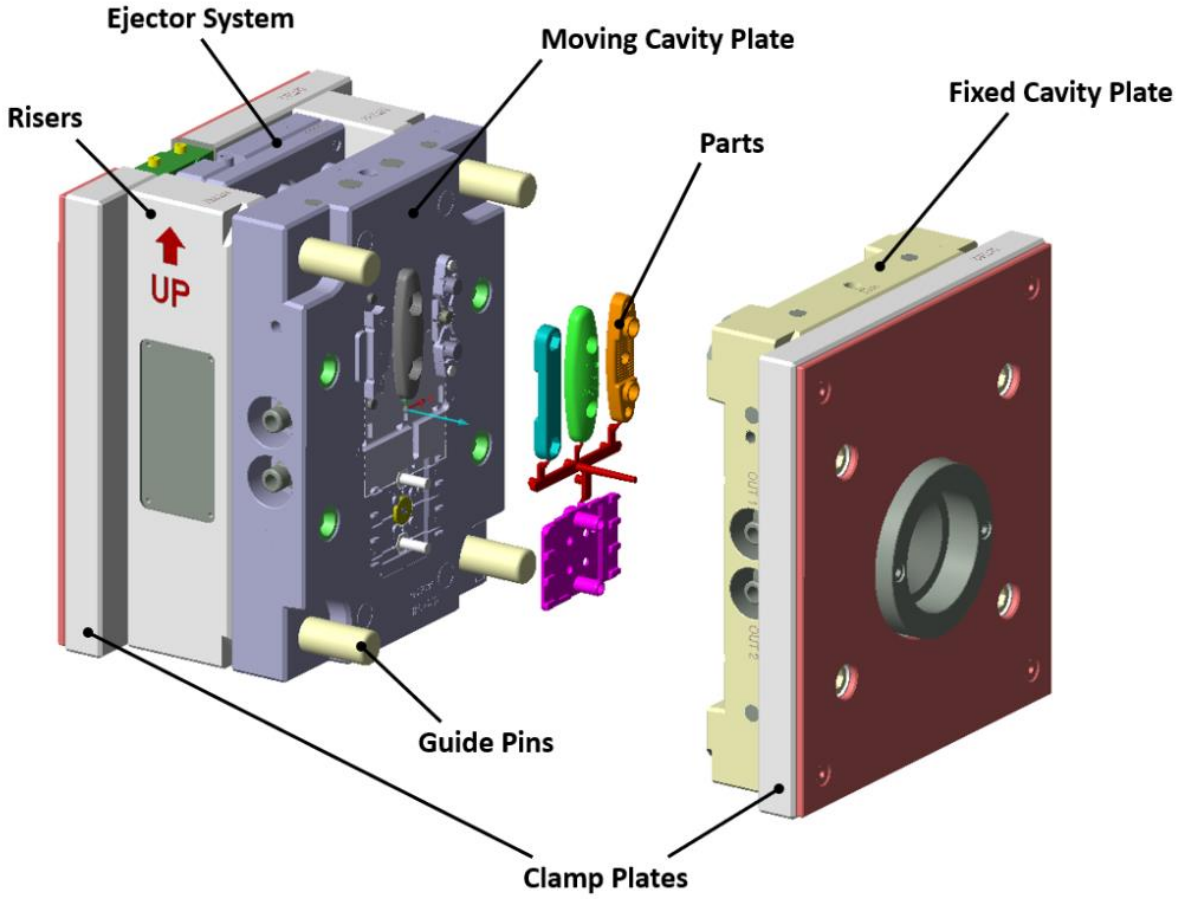


Abbildung 6 - Aufbau eines einfachen Spritzgusswerkzeugs (Quelle: AAV Plastics, o.D.)

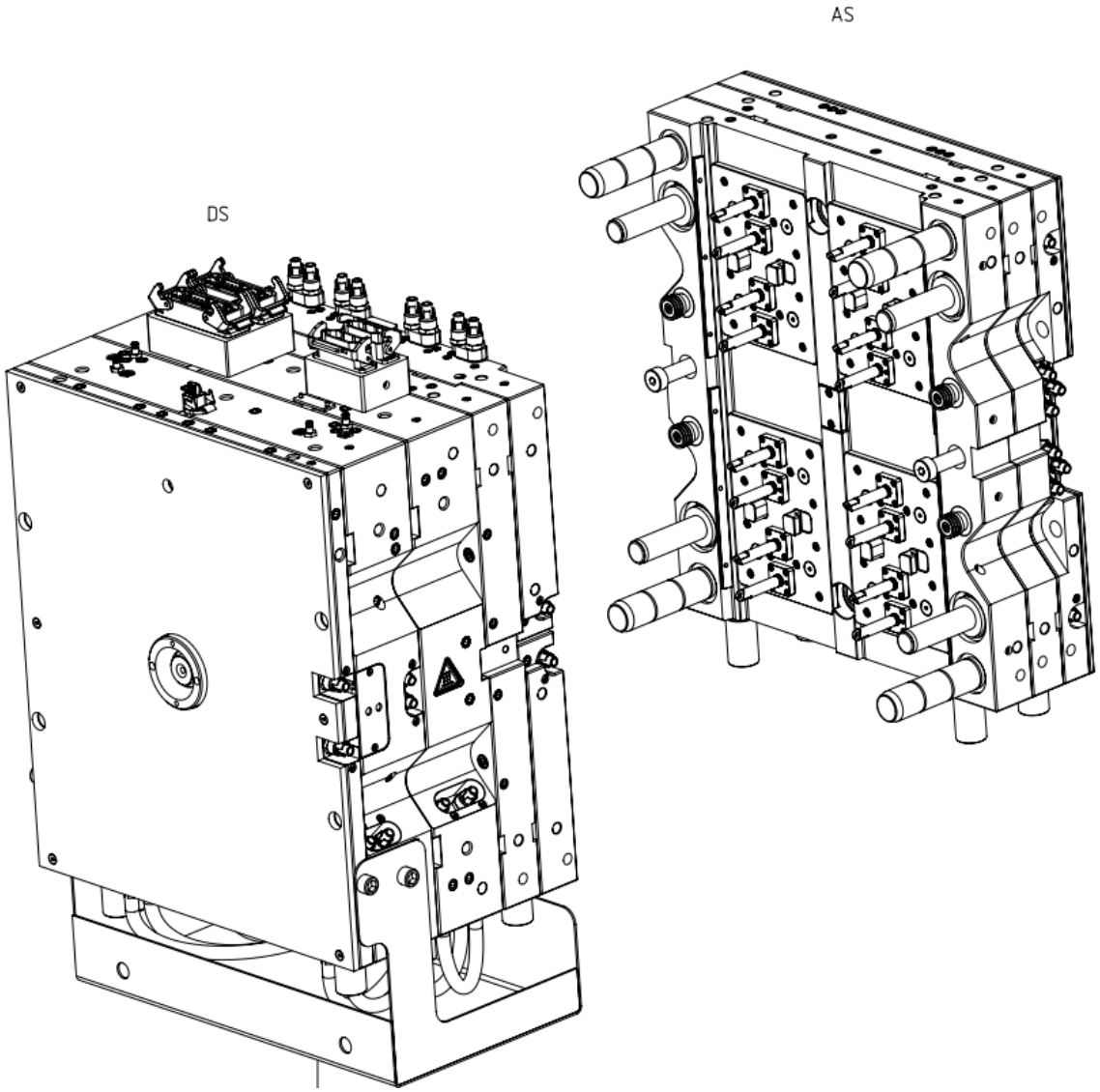


Abbildung 7 - Beispiel eines komplexen Medizinaltechnik-Werkzeugs (Quelle: Eigene Darstellung)

6.1.2 Das Umbausatz Konzept

Das Umbausatz Konzept hat das Ziel Werkzeugkosten zu sparen. Es ermöglicht das Verwenden, derselben Stammform für unterschiedliche Teilegeometrien. Die Voraussetzung ist eine möglichst ähnliche Geometrie des Formteils sowie ein ähnliches Füllvolumen. Auch der Ablauf des Entformens darf sich nicht ändern. Grundsätzlich besteht ein komplettes Werkzeug bei den meisten industriellen Herstellern aus 2 Baugruppen.

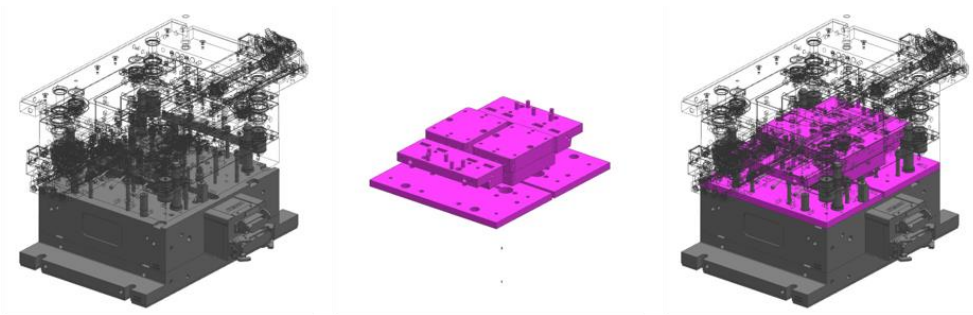


Abbildung 8 - Aufteilung eines Werkzeuges (Quelle: Eigene Darstellung)

Dabei ist es möglich, dass alleine der Umbausatz aufgrund der hohen Präzision und Fertigungstoleranzen bis zu 50% des gesamten Werkzeugwertes ausmacht. Einige dieser Umbausatzsysteme sind so konzipiert, dass sie, um weitere Kosten zu sparen, bereits auf der Spritzgussmaschine gewechselt werden können. Das minimiert die Wechselzeit und den daraus entstehenden Maschinens/Produktionsstillstand.

6.1.3 Materialien und Präzision

Spritzgusswerkzeuge wie die dargestellten werden aus hochfesten Werkzeugstählen gefertigt, typischerweise in der Medizinaltechnik aus korrosionsbeständigeren Stählen wie 1.2085. Die Kavitäten werden in solchen Formen für eine maximale Standzeit üblicherweise als Wechseleinsätze ausgelegt und sind in den allermeisten Fällen aus gehärtetem PM-Stahl mit einer Härte von bis zu 62 HRC. Die Kavitätenoberflächen sind auf wenige Mikrometer genau bearbeitet durch Fräsen, Erodieren und Polieren. Diese Präzision ist notwendig, weil jeder Oberflächendefekt im Werkzeug direkt als Fehler auf dem Kunststoffteil abgebildet wird.

6.1.4 Kosten und Investition

Die Herstellung eines Spritzgusswerkzeugs erfordert hunderte bis tausende Stunden an Konstruktions- und Fertigungsarbeit. Die Kosten liegen typischerweise im sechsstelligen Frankenbereich. Ein mittelkomplexes Werkzeug kostet zwischen CHF 80'000 und CHF 250'000, hochkomplexe Werkzeuge mit mehreren Materialien (2 oder 3-Komponenten-Spritzguss) oder aufwändiger Mechanik deutlich mehr. Ein grösserer Betrieb besitzt oft einige bis hunderte solcher Werkzeuge.

Diese Werkzeuge sind keine Verbrauchsgüter, sie sind Investitionsgüter mit einer erwarteten Lebensdauer von mehreren hunderttausend bis Millionen Schuss. Jeder Schaden verkürzt diese Lebensdauer oder erfordert teure Revisionen. Durch sachgerechte Handhabung, vorbeugende Wartung, Revisionen und den rechtzeitigen Austausch von Verschleissteilen kann die wirtschaftliche Nutzungsdauer erheblich verlängert werden. Eine unbegrenzte Standzeit ergibt sich daraus wegen Verschleiss, Ermüdung und weiteren Alterungsmechanismen nicht.

6.1.5 Warum Zustandsüberwachung relevant ist

Die Kombination aus hohem Investitionswert, empfindlicher Mechanik und rauem Betriebsalltag (Kräne, Stapler, schwankende Lagerbedingungen) macht Spritzgusswerkzeuge zu idealen Kandidaten für eine Zustandsüberwachung. Genau das ist der Ausgangspunkt dieser Arbeit.

6.2 Betriebsphasen eines Spritzgusswerkzeugs

Ein Spritzgusswerkzeug durchläuft im industriellen Einsatz vier wiederkehrende Betriebsphasen. Für jede Phase sind andere Umgebungsbedingungen und Belastungen relevant und damit andere Messwerte und Intervalle.

Produktion

Im Produktionsbetrieb verbleibt das Werkzeug über mehrere Wochen ununterbrochen auf der Spritzgussmaschine. Es wird zyklisch geöffnet und geschlossen, dabei auf Betriebstemperatur gehalten (typisch 40-120 °C je nach Kunststoff und Werkzeug). Das Werkzeug ist kabelgebunden mit Energie versorgt. In dieser Phase sind Zykluszeiten, Produktionsblöcke und die Umgebungstemperatur die relevanten Messgrössen. Die Belastung für das Werkzeug ist in dieser Phase in einer enormen Grösse. Das Werkzeug im unteren Beispiel wird mit rund 160 Tonnen Kraft bei jedem Zyklus zugehalten und die 32 Kavitäten werden in wenigen Zehntelsekunden mit flüssigem Kunststoff bei 1'800 Bar Druck und einer Schmelzetemperatur von 200°C gefüllt. Die gesamte Wärme die dem Werkzeug in dieser Phase und unter dem genannten Druck zugeführt wird muss innert wenigen Sekunden wieder abgeführt werden.

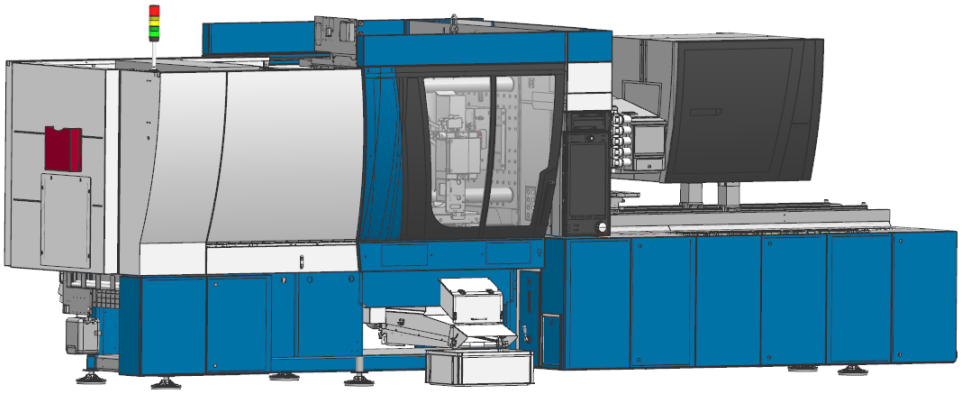


Abbildung 9 - Spritzgusswerkzeug auf Spritzgussmaschine (Quelle: Eigene Darstellung)

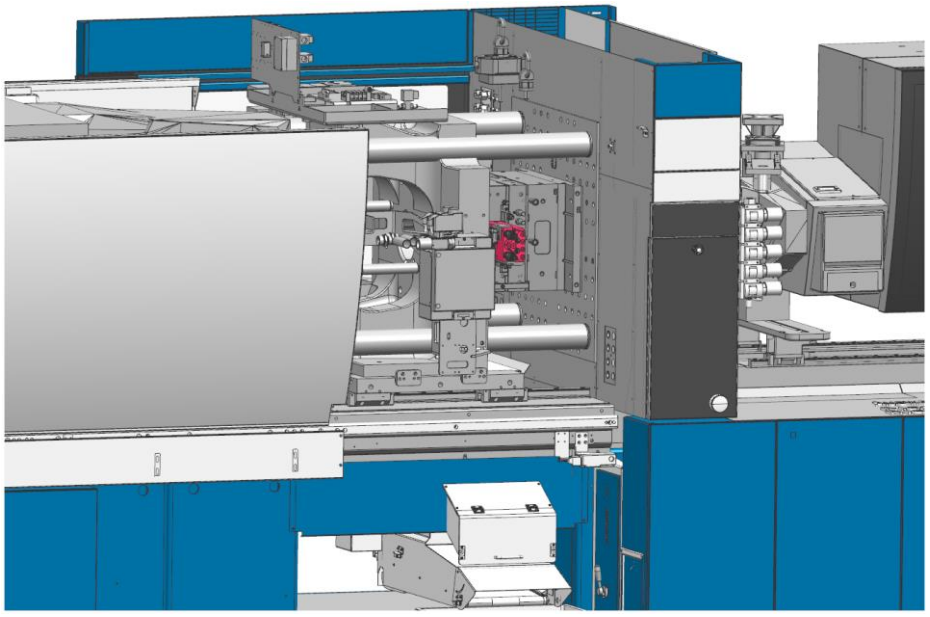


Abbildung 10 - Türe der Spritzgussmaschine entfernt (Quelle: Eigene Darstellung)

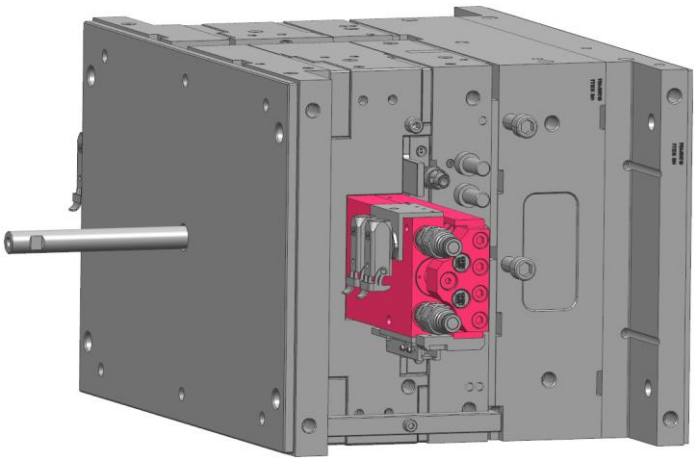


Abbildung 11 - Spritzgusswerkzeug mit Kernzugeinheit (Hydraulisch) (Quelle: Eigene Darstellung)



Abbildung 12 - Spritzgusswerkzeug Plunger Rod 32-fach auf einer Engel e-motion 310/160 T Spritzgussmaschine (Quelle: Eigene Fotos)

Die Dauer eines Spritzguss-Zyklus variiert stark nach den verschiedenen Eigenschaften des Werkzeuges. Abbildung 12 zeigt ein Werkzeug in einer Zyklus optimierten Ausführung. Um die hohen Investitionskosten schneller amortisieren zu können ist es entscheidend die Ausstossmenge der Kunststoffartikel in derselben Zeit zu erhöhen. Zu erkennen sind einige Kühlschläuche, die mit dem Werkzeug verbunden sind (Graue metallfarbene Schläuche) und Grün/Gelbe Kabel, welche für die Steuerung der Servoantriebe für die Entfernung der Kerne (Kernzugeinheiten) aus den Kunststoffteilen verantwortlich sind. *Solche Systeme werden typischerweise hydraulisch betätigt, können aber bei komplexen Geometrien oder herausfordernden Zyklus-Zeit-Anforderungen durchaus der entscheidende Mechanismus sein, um die gewünschte Performance zu erreichen.*
Auffällig bei diesem Werkzeugbeispiel ist die Menge an Kühl-Kreisläufen. Hier wurde absichtlich die maximal mögliche Wärmeausbringung aus dem Spritzling versucht. Das gezeigte Werkzeug produziert jeweils 32 Teile in einem Zyklus von 10.5 Sekunden. Ein höherer Ausstoss ist selbst mit noch mehr Investition kaum mehr zu erreichen.

Die Mehrinvestitionen alleine in die optimierte Kühlung und Servo-Steuerung beim vorherigen Beispiel übersteigen bereits CHF 150'000 Mehrkosten. Grundsätzlich rechnet sich dies aber bereits nach einigen Tagen Produktionsdauer, da bei hoher Kapazität beispielsweise ein weiteres Werkzeug eingespart werden kann.

Der Spritzgusszyklus besteht typischerweise in einer vereinfachten Darstellung dieser Reihenfolge



Abbildung 13 - Visualisierung des schematischen Spritzgusszyklus (Quelle: Eigene Darstellung)

An der Spritzgussmaschine werden solche Zyklen oft auch visualisiert. Ein Beispiel für solch eine Visualisierung wäre diese Grafik

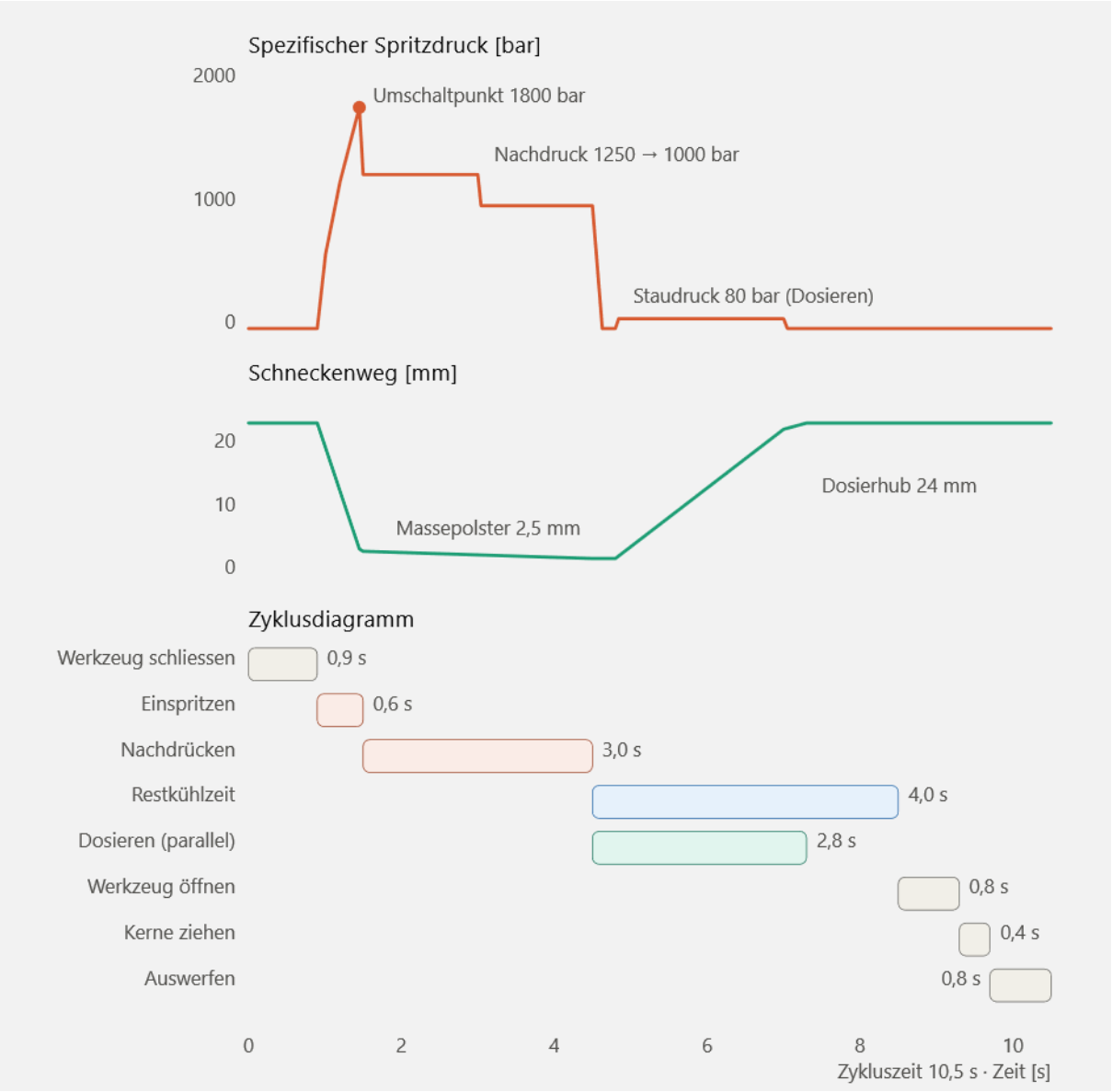


Abbildung 14 - Schematischer Spritzgiesszyklus für das 32-fach-Werkzeug Plunger Rod (POM, Massetemperatur 200 °C, Umschaltdruck 1800 bar, Zykluszeit 10,5 s). Darstellung generiert mit Claude (Anthropic), Phasenaufteilung und Druckprofil als repräsentative Annahmen des Verfassers, nicht als Maschinen-Istwerte.

Für die entsprechende Ausstossmenge eines Produktionstages kann diese Formel verwendet werden:

$$N_{24} = Ausstossmenge\ in\ 24\ h\ [Teile/24h]$$
$$tz = Zykluszeit\ [s]$$
$$nK = Anzahl\ Kavitäten$$
$$3600 = Sekunden\ pro\ Stunde\ [s/h]$$
$$24 = Stunden\ pro\ Tag\ [h]$$

$$N_{24} = (3600 \div tz) \times nK \times 24$$

$$N_{24} = (3600 \div 10.5) \times 32 \times 24 = \mathbf{263'314\ Teile/24h}$$

Bei einer angenommenen durchgehenden Zykluszeit von 10.5 s und 32 Kavitäten ergibt sich eine theoretische Ausbringung von rund 263'314 Teilen pro 24 Stunden (ohne Stillstände, Ausschuss und Wirkungsgradverluste). Die Rechnung zeigt den Einfluss von Unterbrüchen auf die mögliche Stückzahl; über die wirtschaftliche Rentabilität allein lässt sich daraus noch keine Aussage ableiten.

Rüsten

Beim Rüsten wird das Werkzeug meist mit einem Hebeequipment auf der Spritzgussmaschine platziert und aufgespannt. Meist erfolgt die Positionierung mit Zentrierelementen die in der Maschinenplatte eintauchen. Das Verschrauben/Aufspannen erfolgt entweder direkt mit Maschinenschrauben oder indirekt über Spannbacken, die das Werkzeug auf die Maschinenplatte drücken. Diese Prozedur ist eine der heikleren Arbeiten da hier jeder Fehler direkte Beschädigungen bei Maschine und Werkzeug hervorrufen kann. Daher ist zu empfehlen, dass dieser Schritt nur durch geschultes und selbstsicheres Personal erfolgt. Befindet sich das Werkzeug erst mal auf der Maschine und ist dieses sicher verschraubt wird es an die Heiz/Kühlkreise angeschlossen und auf Betriebstemperatur aufgeheizt. Idealerweise erfolgt die erste Öffnung der beiden Formhälften, sobald das Werkzeug auf Betriebstemperatur ist. Zu diesem Zeitpunkt müssen alle Schliess und Hebevorrichtungen vom Werkzeug entfernt sein. Die Spritzgussmaschine kann bei Bedarf eine derartige Kraft die beim Öffnungshub bieten, dass etwaige vergessene Werkzeugschlösser aus Stahl bereits gerissen sind.

Etwaige Probleme in dieser Phase sind mechanische Belastungen durch das heben mit dem Kran und Handling sowie, was relativ häufig auftritt, Fehlbedienungen im kalten Zustand. Die Rüstphase ist nach eigener Erfahrung die kritische Phase für Schäden im kalten Zustand.
Um sich das ganze in realistischerer Form vorstellen zu können: Das Werkzeugbeispiel vom vorherigen Punkt Produktion mit dem 32-Kavitäten wiegt rund 2'000 kg. Das Rüsten eines solchen Werkzeuges ist damit eine grosse Herausforderung.

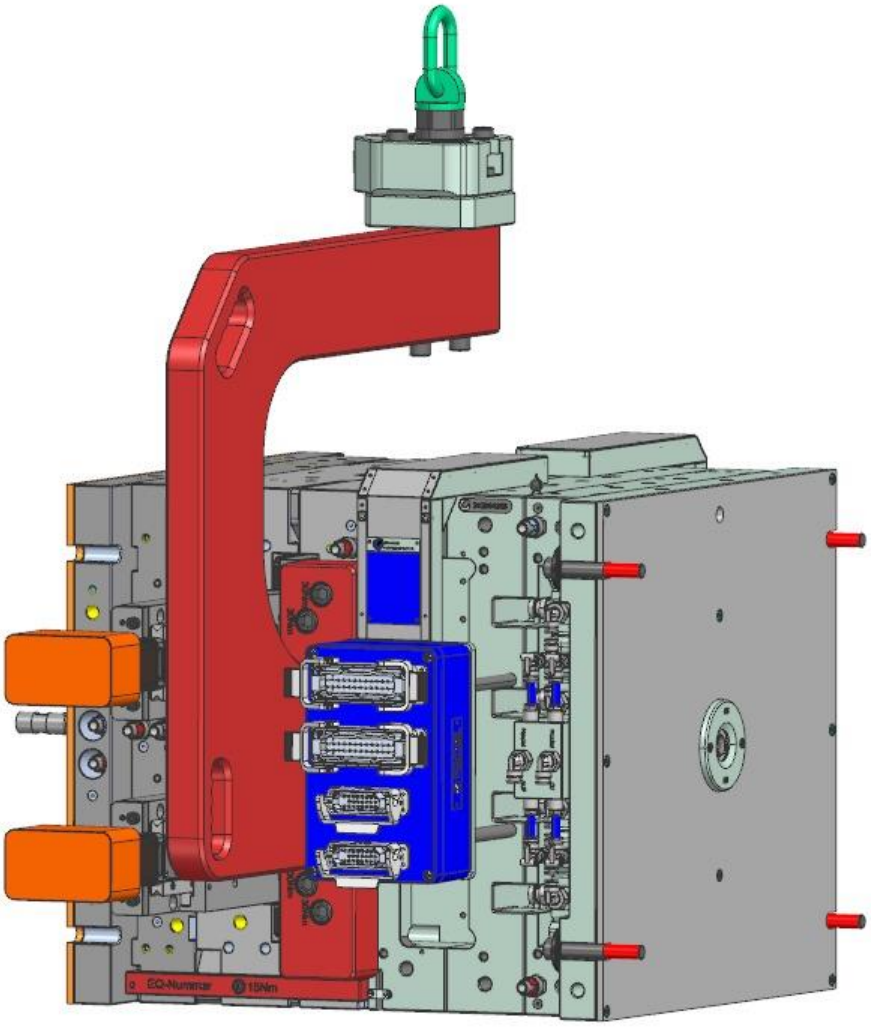


Abbildung 15 - Beispiel eines Spritzgusswerkzeuges mit C-Haken Hebevorrichtung (Quelle: Eigene Darstellung)

Transport

Werkzeuge werden mit Kränen, Staplern oder Hubwagen bewegt. Harte mechanische Schocks z.B. ein Absetzen auf der Palette, ein Anfahren im Regal sind typisch. Während des Transports ist das Werkzeug in der Regel nicht mit Energie versorgt. Unter Transport kann auch die logistische Umpositionierung in ein anderes Werk, beispielsweise auch in einem anderen Land oder gar anderen Kontinent gemeint sein. In dem falle, gerade auch auf dem Weg über das Meer, kann die Dauer der Transportphase deutlich länger sein.



Abbildung 16 - Beispiel eines Spritzgusswerkzeuges welches für den Transport vorbereitet wurde (Quelle: Selmax Corporation, o.D.)

Das Werkzeug befindet sich hier gespannt auf einer Palette und eingewickelt in Folie. Für einen Seetransport wäre diese Schutzschicht nicht ausreichend: Die salzhaltige Seeluft und die Temperaturschwankungen in Schiffscontainern führen zu Kondensation auf den Werkzeugoberflächen. Standardmässig werden Exportwerkzeuge zusätzlich mit VCI-Folie (Volatile Corrosion Inhibitor) und Korrosionsschutzöl behandelt und in eine Holzkiste verpackt.

Lagerung

Im Lager steht das Werkzeug still, typischerweise in einem schlecht klimatisierten Hochregallager. Temperatur und Luftfeuchtigkeit schwanken mit der Jahreszeit und Tageszeit. Kondenswasser auf den Werkzeugstahl-Oberflächen führt zu Korrosion. Die Lagerphase kann Tage bis Monate dauern. In dieser Phase sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit und die daraus berechnete Taupunktdifferenz die entscheidenden Messgrössen.

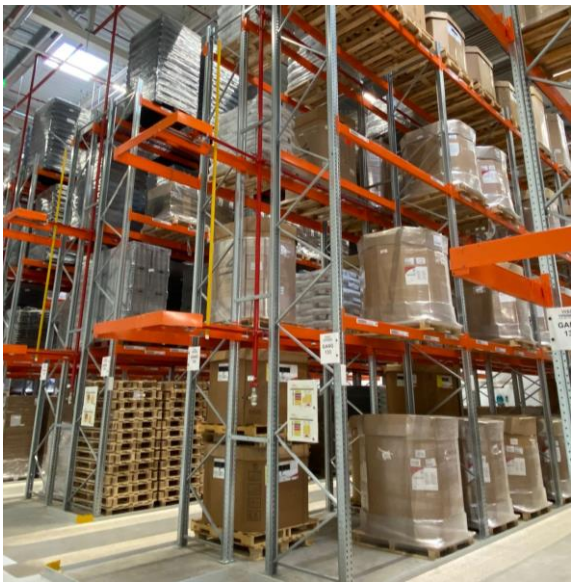


Abbildung 17 - Beispiel eines Hochregallagers eines Medizintechnik Betriebes (Quelle: Eigenes Foto)

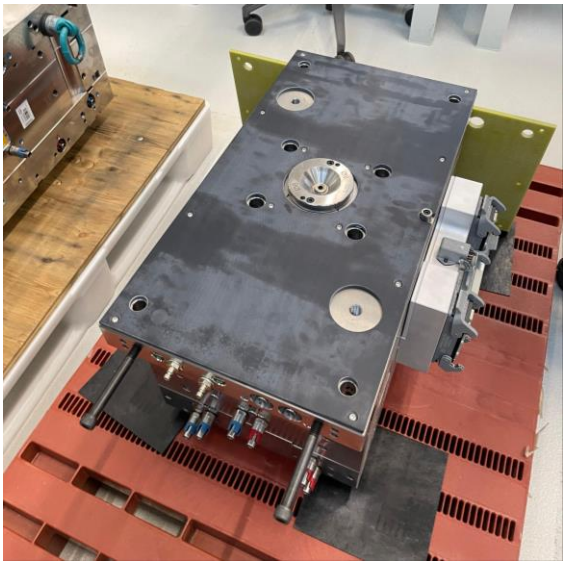


Abbildung 18 - Beispiel eines Werkzeuges welches innerhalb des Werkes auf einer Kunststoffpalette transportiert wird (Quelle: Eigenes Foto)

6.3 Schadensmechanismen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Schadensmechanismen und deren wirtschaftliche Auswirkungen basieren auf meiner Berufserfahrung. Öffentlich zugängliche Fallstudien zu konkreten Werkzeugschäden existieren kaum: Werkzeugdesigns unterliegen regelmässig Geheimhaltungsvereinbarungen (NDA), und Schadensfälle betreffen interne Betriebsdaten, die von Unternehmen nicht freiwillig veröffentlicht werden. Wo verfügbar, werden externe Quellen referenziert.

Meine Erfahrung aus zehn Jahren in der Spritzgussbranche zeigt, dass die kostspieligsten Werkzeugschäden selten während der laufenden Produktion entstehen. Sie passieren davor, danach und dazwischen. Beim Einlagern, beim Transport und beim Wiederanfahren und bei Störungen. Vier Schadensmechanismen sind nach dieser Erfahrung für einen wesentlichen Teil der vermeidbaren Kosten verantwortlich: Korrosion durch Kondenswasser, mechanische Schockschäden beim Handling, Fehlbedienung im kalten Zustand und Crash Ereignisse bei überdrückten Störungen. Für jeden dieser Mechanismen wird im Folgenden beschrieben, was

physikalisch geschieht, welche wirtschaftlichen Folgen ein Schadensfall hat, und wie das in dieser Arbeit entwickelte System das Ereignis erkennt.

Korrosion durch Kondenswasser oder Seetransport
Werkzeugstähle (z.B. 1.2085) sind nicht vollständig korrosionsbeständig. Wenn der Werkzeugstahl kälter ist als der Taupunkt der umgebenden Luft, kondensiert Wasser auf der Oberfläche. Auch in nicht klimatisierten Lagern tritt dies besonders in der Übergangszeit (Frühling, Herbst) auf, wenn nachts kalte Werkzeuge mit feuchter Tagesluft in Kontakt kommen. Korrosion an den Kavitäten führt zu Oberflächendefekten auf den Spritzteilen, die aufwändig nachpoliert werden müssen. In schweren Fällen muss die Kavität neu erodiert oder das Werkzeug revidiert werden. **Ein öffentliches Beispiel:** Ein grosses Werkzeug für Automobilteile wurde für den Übersee-Transport verpackt. Schwankende Luftfeuchtigkeit und Temperaturzyklen in Schiffscontainern verursachten Kondensation auf Metalloberflächen (Holmquist & Eischens, 2021). **Erkennung (Zielbild): Temperatur und Luftfeuchtigkeit messen, Taupunkt berechnen, Differenz zur Werkzeugtemperatur überwachen. Im Prototyp wird die Differenz zur gemessenen Lufttemperatur verwendet (Kapitel 6.4.2).** Wenn die Differenz einen Schwellenwert unterschreitet, besteht Kondensationsrisiko.
Mechanische Schockschäden
Ein Spritzgusswerkzeug kann mehrere hundert Kilogramm bis wenige Tonnen wiegen. Beim Handling mit Kran oder Stapler sind harte Stösse manchmal unvermeidlich. Ein hartes Absetzen auf der Palette oder ein Anstoss im Hochregal kann feinmechanische Komponenten beschädigen: Schieber, Anbauteile, Kernzugeinheiten oder andere aus dem Werkzeug ragende Komponenten. Diese Schäden werden oft erst bei der nächsten Produktion bemerkt. Spätestens dann sind Ursache und Verursacher nicht mehr rekonstruierbar. In der Transportlogistik wird zur Erkennung von Schockschäden üblicherweise mit Schwellenwerten zwischen 5 g und 75 g gearbeitet, wobei für schwere Industriekomponenten mit empfindlicher Innenmechanik typischerweise ein Bereich von 15-25 g empfohlen wird (SpotSee, o.D.). **Erkennung (umgesetzt): Beschleunigungssensor (Accelerometer) mit definiertem Schwellenwert.** Bei Überschreitung wird ein Schock-Ereignis mit Zeitstempel protokolliert. Da der Schwellenwert aufgrund des Werkzeuggewichtes variieren kann muss dieser Parameter einstellbar sein.
Kaltstart-Fehlbedienung
Das Betätigen von Nadelverschlussdüsen oder das gewaltsame Öffnen der Werkzeugtrennebene im nicht-aufgeheizten Zustand ist nach eigener Erfahrung eine häufige Ursache für teure Heisskanal- und Mechanikschäden. Kunststoffreste in Kanälen und Düsen sind bei Raumtemperatur hart und blockieren die Bewegung. Wird trotzdem Kraft aufgebracht, brechen Nadelverschlüsse im Formeinsatz, die Nadeln oder es verformen sich Kanäle. Ein öffentliches Beispiel: Wenn die Nadel eines Nadelverschlusses sich im kalten Zustand nicht bewegen kann (gleicher Werkstoff, gleicher Wärmeausdehnungskoeffizient), und trotzdem Druck aufgebracht wird, kann die Ventileinheit brechen. Ausgelaufenes und erstarrter Kunststoff (Im Englischen Resin genannt) kann beim nächsten Zyklus das Werkzeug beschädigen (Mitsubishi Materials Corp, 1998). Die Funktion des Werkzeuges mit nicht intaktem Verschluss ist nicht gegeben. Ein weiteres Beispiel zeigt, dass bereits ein 10 Stündiger Ausfall bereits $30'000 in Produktionsausfällen bedeuten kann (MoldMaking Technology, 2010). **Erkennung (Zielbild): Kombination aus Temperatur (unter Betriebstemperatur) und Werkzeugbewegung (Kontakt Öffnungsbewegung erkannt). Wenn ein Zyklus stattfindet, obwohl das Werkzeug kalt ist, liegt ein**

potenzieller Kaltstart vor. Im Prototyp ist diese Auswertung mangels Stahltemperatur nicht umgesetzt (Kapitel 11.8).

Crash-Ereignisse bei überdrückten Störungen

Im laufenden Produktionsbetrieb können Störungen auftreten: ein Fremdkörper wird eingeklemmt, ein Auswerferstift bricht, ein Teil löst sich nicht vollständig aus der Kavität. Die Spritzgussmaschine erkennt solche Störungen in vielen Fällen und zeigt eine Warnung an. Wird diese Warnung vom Bedienpersonal überdrückt, beispielsweise in der Nachtschicht unter Zeitdruck, schliesst das Werkzeug auf den Fremdkörper. Die resultierende Kollision kann Kavitäten, Schieber oder Auswerfer schwer beschädigen.

Ein öffentliches Beispiel: Ein Konsumgüterhersteller hatte durchschnittlich zwei Vorfälle pro Jahr, bei denen ein Teil im Werkzeug steckenblieb und das Werkzeug beim nächsten Zyklus darauf schloss. Als Resultat entstanden über USD 10'000 pro Vorfall für Reparatur oder Ersatz, ohne Berücksichtigung der Stillstandskosten (AAV Plastics, o.D.).

Eigene Einschätzung zu diesem Fall: *Beim Werkzeug, welches auf der Abbildung dargestellt wird handelt es sich aber nicht um ein hochkomplexes, hochkavitätiges Spritzgusswerkzeug. Die genannte Summe kann sich aus eigener Erfahrung mit steigender Werkzeugkomplexität stark erhöhen.*

Diese Schäden gehören zu den teuersten Einzelereignissen im Werkzeugbau. Ohne objektive Daten ist die Ursachenrekonstruktion unmöglich. Der Schaden wird oft erst Stunden oder Schichten später bemerkt, wenn das Werkzeug bereits von anderen Personen bedient wurde.

Erkennung (Zielbild): Der Beschleunigungssensor registriert den mechanischen Schock der Kollision als Crash-Ereignis mit Zeitstempel. In Kombination mit den Produktionsblockdaten ist rekonstruierbar, in welchem Zyklus und zu welcher Uhrzeit das Ereignis stattfand.

Einordnung für den vorliegenden Prototyp: Der BME280 berechnet den Taupunkt der erfassten Luft. Eine Werkzeugoberflächentemperatur wird nicht gemessen. Damit lässt sich Feuchte in der Sensorumgebung als Risikohinweis erfassen; die Bildung von Kondenswasser am Stahl sowie ein temperaturbedingter Kaltstart können nicht direkt erkannt werden. Mechanische Schockereignisse werden mit Zeitstempel und Zählerstand aufgezeichnet, sind jedoch ohne zusätzliche Daten keine eindeutige Diagnose eines Werkzeugschadens oder einer Kollisionsursache.

6.4 Taupunktberechnung und Kondensationsrisiko

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 2).

Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der die Luft bei gegebenem Feuchtigkeitsgehalt gesättigt ist und Kondensation einsetzt. Er wird aus Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit berechnet.

6.4.1 Berechnung

Die Berechnung erfolgt nach der Magnus-Formel mit den Konstanten nach Sonntag (1990):

$$a = 17.62$$
$$b = 243.12\,°C$$

$$\alpha(T, RH) = (a \cdot T) / (b + T) + ln(RH / 100)$$

$$Taupunkt\ Td = (b \cdot \alpha) / (a - \alpha)$$

$$T = Umgebungstemperatur\ in\ °C$$
$$RH = relative\ Luftfeuchtigkeit\ in\ \%$$
$$T_d = Taupunkttemperatur\ in\ °C$$
$$ln = natürlicher\ Logarithmus$$

(Häckel, 2016)

6.4.2 Schwellenwert Kondensationsrisiko

Ein Kondensationsrisiko besteht, wenn die Differenz zwischen Umgebungstemperatur (oder Werkzeugoberfläche) und Taupunkt einen definierten Schwellenwert unterschreitet. Kondensation an einer Oberfläche setzt idealisiert dann ein, wenn deren Temperatur den Taupunkt der angrenzenden Luft erreicht oder unterschreitet. Der hier verwendete Abstand von 3 °C ist kein physikalischer Kondensationsbeginn, sondern eine vorsorgliche Warnschwelle. Lokale Temperaturunterschiede, Messfehler und veränderte Luftbedingungen können dazu führen, dass die Oberfläche kälter ist als der angenommene Messpunkt.

Folgendes kann die korrekte Bestimmung erschweren:

- Sensorgenauigkeit: Typische kombinierte Sensoren weisen Toleranzen von ±0.5 °C (Temperatur) und ±3 % rH (Luftfeuchtigkeit) auf. Daraus resultiert eine Unsicherheit in der Taupunktberechnung von ca. ±1-2 °C.
- Lokale Temperaturunterschiede: Die Werkzeugoberfläche ist nicht homogen temperiert. Ecken, Trennebenen und Kühlkanalregionen können lokal kälter sein als der gemessene Punkt.
- Umgebungsschwankungen: In nicht klimatisierten Lagern können Temperatur und Luftfeuchtigkeit sich schneller ändern als das Messintervall des Systems. Daher ist hier ein sinnvolles Messintervall zu erfassen.

Kondensation ist eine Frage von zwei Temperaturen: der Oberflächentemperatur des Stahls und dem Taupunkt der Luft, die ihn umgibt. Beschlag entsteht, wenn der Stahl kälter ist als dieser Taupunkt. Das Sensor-Modul misst nur die Luft. Aus Temperatur und Feuchte berechnet es den Taupunkt und vergleicht ihn mit der Lufttemperatur. Diese Differenz ΔT sagt, wie nahe die Luft an der Sättigung ist: Bei 18 °C entspricht $\Delta T < 3$ °C einer relativen Feuchte über rund 82 %, fast unabhängig von der Temperatur. Damit erkennt das Modul den Fall «feuchte Umgebung»: nicht klimatisiertes Lager, Keller, Wetterumschwung. Dort beschlägt jede Fläche, die nur wenig kühler ist als die Luft.

Nicht erkannt wird der Fall «kaltes Werkzeug in warmer Luft». Kommt ein Werkzeug mit 10 °C aus dem Lastwagen in eine Halle mit 22 °C und 60 % rF, liegt der Taupunkt der Hallenluft bei 13.9 °C. Der Stahl beschlägt sofort und bleibt nass, bis er über 14 °C ist; bei einem Werkzeug von mehreren hundert Kilogramm dauert das Stunden. Das Modul misst in diesem Moment $\Delta T = 8$ °C und meldet nichts. Für diesen Fall braucht es die Temperatur des Stahls. Der Anschluss «E» (Kapitel 8.4) ist dafür vorgesehen; die Auswertung ist in dieser Version nicht umgesetzt (Kapitel 15).

Es sind drei Grössen zu trennen: (1) der aus Temperatur und relativer Feuchte berechnete Taupunkt T_d der Luft, (2) die Sensortemperatur T_S und (3) die nicht gemessene Stahloberflächentemperatur T_W. Der implementierte Indikator $\Delta T_S = T_S - T_d$ beschreibt ausschliesslich den Sättigungsabstand am Ort des Sensors. Für tatsächliche Kondensation am Werkzeug wäre $T_W \leq T_d$ massgebend. Aus $\Delta T_S \leq 3$ °C folgt daher nicht unmittelbar, dass sich am Werkzeug Kondenswasser bildet.

6.4.3 Rechenbeispiel

Gegeben: T = 18 °C, RH = 75 %

Schritt 1: α berechnen

$$\alpha = (17.62 \cdot 18) / (243.12 + 18) + \ln(75 / 100)$$
$$\alpha = 317.16 / 261.12 + \ln(0.75)$$
$$\alpha = 1.2146 + (-0.2877)$$
$$\alpha = 0.9269$$

Schritt 2: Taupunkt berechnen

$$\mathrm{Td} = (243.12 \cdot 0.9269) / (17.62 - 0.9269)$$
$$\mathrm{Td} = 225.34 / 16.693$$
$$\mathrm{Td} = 13.50\ °\mathrm{C}$$

Schritt 3: Abstand zum Taupunkt

$$\Delta\mathrm{T} = \mathrm{T} - \mathrm{Td} = 18.00 - 13.50 = 4.50\ °\mathrm{C}$$

Ergebnis: Bei 18 °C und 75 % relativer Luftfeuchtigkeit liegt der Taupunkt bei 13.5 °C, der Abstand beträgt 4.5 °C. Sinkt die Oberflächentemperatur unter 13.5 °C, bildet sich Kondenswasser.

Einfluss der Sensortoleranz

Für die Entscheidung zählt der Abstand ΔT = T − Td. Ein Alarm wird verpasst, wenn das Gerät ΔT zu gross schätzt. Das ist der Fall, wenn die gemessene Temperatur zu hoch und die gemessene Feuchte zu tief liegt. Mit den Toleranzen ±0.5 °C und ±3 % rF ist der ungünstigste Fall:

$$\mathrm{T_mess} = 18\ °\mathrm{C} + 0.5\ °\mathrm{C} = 18.5\ °\mathrm{C}$$
$$\mathrm{RH_mess} = 75\ \% - 3\ \% = 72\ \%$$

Schritt 1: α berechnen

$$\alpha = (17.62 \cdot 18.5) / (243.12 + 18.5) + \ln(72 / 100)$$
$$\alpha = 325.97 / 261.62 + \ln(0.72)$$
$$\alpha = 1.2460 + (-0.3285)$$
$$\alpha = 0.9175$$

Schritt 2: Taupunkt berechnen

$$\mathrm{Td} = (243.12 \cdot 0.9175) / (17.62 - 0.9175)$$
$$\mathrm{Td} = 223.06 / 16.703$$
$$\mathrm{Td} = 13.35\ °\mathrm{C}$$

Schritt 3: Abstand und Fehler

$$\Delta\mathrm{T_mess} = 18.5 - 13.35 = 5.15\ °\mathrm{C}$$
$$\mathrm{Fehler} = \Delta\mathrm{T_mess} - \Delta\mathrm{T_wahr} = 5.15 - 4.50 = +0.65\ °\mathrm{C}$$

Im ungünstigsten Fall schätzt das Gerät den Abstand zum Taupunkt um rund 0.65 °C zu gross. Zusätzlich sind lokale Temperaturunterschiede auf der Werkzeugoberfläche (Ecken, Trennebenen, Kühlkanalregionen) zu berücksichtigen, die vom Sensor nicht erfasst werden.

Die berechneten rund +0.65 °C beschreiben ausschliesslich den hier gewählten Toleranzfall bei 18 °C und 75 % rF mit den angenommenen Sensorabweichungen. Dieser Wert ist keine nachgewiesene obere Fehlergrenze über den gesamten Betriebs- und Feuchtebereich. Nicht enthalten sind die thermische Beeinflussung durch das Gehäuse und die Temperaturdifferenz zwischen Sensorort und Werkzeugoberfläche.

Festlegung: Der Schwellenwert wird auf ΔT ≤ 3 °C festgelegt. Er enthält den Messfehler von 0.65 °C mit Reserve. Erreicht oder unterschreitet die Differenz zwischen gemessener Umgebungstemperatur und berechnetem Taupunkt 3 °C (ΔT ≤ 3 °C), wird ein Kondensationsrisiko-Ereignis mit Zeitstempel protokolliert.

6.5 Marktanalyse bestehender Systeme

Die Problemstellung geht davon aus, dass der Markt für Zustandsüberwachung im Spritzguss auf den Schmelzeprozess in der laufenden Maschine ausgerichtet ist, dass diese Systeme für eine flächendeckende Ausrüstung zu teuer sind und dass sie keine Daten liefern, sobald das Werkzeug von der Maschine getrennt wird. Diese Annahme wurde anhand von vier repräsentativen Systemen überprüft: dem etablierten Anbieter für Prozessüberwachung (Kistler), zwei werkzeugintegrierten Systemen führender Werkzeugbauer (Hack, Männer) sowie dem einzigen identifizierten Anbieter, der den Werkzeuglebenszyklus ausserhalb der Maschine adressiert (Digital Moulds). Ausgewertet wurden Herstellerangaben und Fachpresse, Stand September 2026. Listenpreise veröffentlicht keiner der vier Hersteller; sämtliche Angebote erfolgen auf Anfrage.

6.5.1 Kistler ComoNeo



Abbildung 19 - Kistler ComoNeo (Quelle Kistler Group, o.D.)

ComoNeo ist das Referenzsystem für die Prozessüberwachung und -regelung auf Basis des Werkzeuginnendrucks. Piezoelektrische Sensoren in der Kavität erfassen den Druck- und Temperaturverlauf jedes einzelnen Schusses. Das System verarbeitet bis zu 32 Druck- und 16 Temperaturkanäle in Echtzeit, trennt Gut- von Schlechtteilen, schaltet von Einspritz- auf Nachdruck um, balanciert Heisskanäle und bietet mit ComoNeoPREDICT eine KI-gestützte Qualitätsprognose (Kistler, o.D.). Die Sensoren müssen konstruktiv in das Werkzeug eingearbeitet und über Ladungsverstärker verkabelt werden. Kistler bietet dafür eigene mehrstufige Schulungen an. Ein einzelner Werkzeuginnendrucksensor kostet im Handel rund 2'000 USD (mechanizationshop-123, 2026), ein Komplettsystem liegt nach eigener Einschätzung bei mehreren Zehntausend Franken pro Maschine. Das System ist ausschliesslich bei eingebautem Werkzeug und laufender Maschine aktiv.

6.5.2 Hack moldlife® sense



Abbildung 20 - Moldlife sense Bedieneinheit (Quelle (HACK Formenbau GmbH, o.D.)

moldlife® sense (HACK Formenbau GmbH, Kirchheim unter Teck, Deutschland, o.D.) ist ein 2021 eingeführtes, vollständig in das Werkzeug integriertes Überwachungssystem mit eigenem Rechner. Zwei hochauflösende Kameras zeichnen Werkzeugtrennung und Teileauswurf auf, vier Weg- und vier Klopfsensoren an den

Säulenführungen erfassen Werkzeugatmung und Lageabweichungen, weitere Sensoren überwachen Plattenparallelität, Kavitätsoberflächen- und Plattentemperatur sowie die Zentrierung; zusätzlich wird die Werkzeugakustik aufgezeichnet. Die Daten gehen per OPC UA direkt an die Maschinensteuerung, Störungen werden optisch und akustisch gemeldet (Nehls, 2022). Das System wird als Option zu Hack-eigenen Werkzeugen angeboten, ist netzstrombetrieben und an die Maschine gekoppelt. Ausserhalb der Maschine liefert es keine Daten.

6.5.3 männer moldMind II



Abbildung 21 - moldMind II (Quelle: Otto Männer GmbH o.D.)

moldMind II (Otto Männer GmbH, Bahlingen, Deutschland, o.D.) ist ein auf der Werkzeughälfte montiertes Überwachungsgerät mit Display und internem Speicher. Über Temperatur- und Kavitätssensoren im Werkzeug und Heisskanal sowie einen Zykluszähler erfasst es Zyklenzahl, Zykluszeiten, Temperaturprofile sowie Betriebs- und Stillstandszeiten, protokolliert Temperaturabweichungen und Sensorschäden und kann die Maschine über digitale Ausgänge stoppen (Knights, 2018). Das Gerät ist an männer-Werkzeuge und -Heisskanäle gebunden und benötigt fest verbaute Sensorik. Es reist zwar mit dem Werkzeug mit; eine Datenerfassung im ausgebauten, stromlosen Zustand ist jedoch nicht dokumentiert, und Lagerung oder Transport werden nicht als Zustände unterschieden.

6.5.4 Digital Moulds Mould Monitoring



Abbildung 22 - Mould Monitoring (Quelle: Digital Moulds o.D.)

Mould Monitoring (Digital Moulds GmbH, Sierning, Österreich, o.D.) ist das einzige gefundene kommerzielle System, das ausdrücklich als Zustandsüberwachung über den gesamten Werkzeuglebenszyklus konzipiert ist. Das batteriegestützte Gerät wird am Werkzeug montiert, erkennt automatisch den Status Lagerung, Betrieb oder Transport und übermittelt Stückzahl, Zykluszeit und Statuswechsel per Mobilfunk (eSIM) oder WLAN an eine Cloud-Plattform mit Warngrenzen und Wartungsmanagement; in der Professional-Variante können externe Sensoren mit Industriesignalen (0/4-20 mA, 0-10 V) angeschlossen werden (Digital Moulds, 2026). Das System ist damit dem Zielsystem dieser Arbeit am nächsten. Nach eigener Erfahrung aus vorheriger Tätigkeit bei der Ypsomed AG (Stand 2023) lag der Preis bei rund 2'500 CHF einmalig pro Gerät zuzüglich eines Software-Abonnements von 100 bis 200 CHF pro Jahr. Ein öffentlicher Listenpreis existiert nicht. Es unterscheidet sich vom Zielsystem in drei Punkten: Es wird mit laufenden Cloud- und Mobilfunkkosten vertrieben, es setzt eine Mobilfunk- oder WLAN-Verbindung voraus. Das Gerät verfügt über integrierte Beschleunigungssensoren zur

Analyse von Bewegungsmustern darüber werden auch Freifall- und Stossereignisse protokolliert. Umgebungsfeuchte und Taupunkt werden nicht erfasst.

6.5.5 Einordnung

Tabelle 2 - Gegenüberstellung der untersuchten Systeme mit dem Zielsystem

	Kistler ComoNeo	Hack moldlife® sense	männer moldMind II	Digital Moulds	Zielsystem dieser Arbeit
Fokus	Schmelzeprozess (Innendruck)	Werkzeugmechanik im Betrieb	Werkzeugtemperatur, Zyklen	Status, Stückzahl, Tracking	Umgebung und Zustand über alle Phasen
Sensorik im Werkzeug	Ja (Kavität)	Ja (>8 Sensoren, 2 Kameras)	Ja	Nein (Anbau)	Nein (Anbau)
Herstellerbindung	Kistler-Sensorik	Hack-Werkzeuge	männer-Werkzeuge	Cloud-Plattform des Anbieters	Keine
Inbetriebnahme	Fachschulung	Werkzeughersteller	Werkzeughersteller	Plug and Play	Anwender selbst
Aktiv ausserhalb Maschine	Nein	Nein	Nicht dokumentiert	Ja	Ja (Transport, Rüsten, Lager)
Feuchtemessung	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Taupunktbewertung	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja (luftbasierter Risikoindikator)
Schockerkennung	Nein	Nicht dokumentiert	Nicht dokumentiert	Ja	Ja
Autark ohne Verbindung	-	-	-	Teilweise (Nur Aufzeichnung)	Ja
Kosten	Zehntausende CHF (Schätzung)	Zehntausende CHF (Schätzung)	Nicht öffentlich	~2'500 CHF einmalig + 100-200 CHF/Jahr (eigene Erfahrung, Stand 2023; Marktpreis, nicht mit Prototyp-Materialkosten vergleichbar)	CHF 98.37 Einzelteile (Materialkosten Prototyp, Budget CHF 300)

Die vier untersuchten Lösungen setzen unterschiedliche Schwerpunkte. In dieser Auswahl steht Prozessmonitoring beziehungsweise eine vom Anbieter bereitgestellte Plattform im Vordergrund. Kistler, Hack und männer sind Komplettlösungen, die im Betrieb tief in den Prozess hineinschauen: hochauflösend, fachlich anspruchsvoll in Einbau und Interpretation, an den jeweiligen Hersteller gebunden und nur aktiv, solange das Werkzeug in der Maschine läuft. Digital Moulds geht als Einziger in Richtung Fitness-Tracker, koppelt diesen aber an ein Abonnement und eine permanente Datenverbindung. Der dort bekannte Gerätepreis von rund CHF 2'500 (Stand 2023) ist ein Marktpreis und mit dem Materialbudget von CHF 300 für diesen Prototyp nicht direkt vergleichbar. Keine der hier beschriebenen Varianten vereint nach dem untersuchten Informationsstand die für dieses Projekt definierten Merkmale - werkzeuggebundener Akkubetrieb, lokale Ereignisspeicherung ohne Backend und Erfassung relevanter Zustandsdaten ausserhalb der Produktion - in derselben Kombination. Daraus ergibt sich die Positionierung des entwickelten Prototyps innerhalb der betrachteten Lösungen; ein vollständiger Marktüberblick wird damit nicht beansprucht. Aus dieser Lücke leitet sich die Zielsetzung dieser Arbeit ab. Die hohe fachliche Einstiegshürde der bestehenden Systeme ist zudem der Ausgangspunkt für die Analyse des Anwenderprofils in Kapitel 6.6.

6.6 Anwenderprofil - Benutzerkompetenzen im Werkzeugbau

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 3).

Die Marktanalyse hat gezeigt, dass einige der Systeme hochspezialisiert sind und eine längere Einführungsdauer benötigen. Gerade im Werkzeugbau arbeiten hochspezialisierte Profile und in den meisten Betrieben fehlt der «Generalist» bzw. der Systemtechniker, welcher vernetzte Systeme mit Sensorik versteht und integriert.

Diese Einschätzung stützt sich zusätzlich auf meine eigene Berufserfahrung. Als Produktmanager bei der Servomold GmbH, einem Anbieter servoelektrischer Antriebe für Spritzgiesswerkzeuge, führte ich über ein Jahr lang Gespräche mit mehreren Duzend Werkzeugbauern, Werkzeugkonstrukteuren und Werkzeugbetreibern im DACH-Raum. Servomold-Produkte markieren den Übergang von der rein mechanischen zur elektrisch angetriebenen Werkzeugfunktion und damit genau jene Schnittstelle, an der beim Anwender erstmals elektrotechnische Kompetenz erforderlich wird. In diesen Gesprächen stellte ich durchgängig fest, dass entsprechende Grundkenntnisse wie Verdrahtung, Signalführung, Sensorik und deren Inbetriebnahme beim Betreiber praktisch nicht vorhanden waren. Daraus ziehe ich die Schlussfolgerung, dass ein System für dieses Umfeld keine elektrotechnische oder Systemintegrations-Vorkenntnis voraussetzen darf.

Aufgrund dieser Erfahrung ist es sinnvoll nachzuvollziehen welche Profile typischerweise im Werkzeugbau arbeiten.

6.6.1 Vorgehen

Um die Beobachtung aus der Praxis auf eine überprüfbare Grundlage zu stellen, wurde eine Auswertung aktueller Stelleninserate durchgeführt. Als Quelle diente die Rubrik «Werkzeugbau» des Stellenportals jobs.ch, welche am 12. September 2026 siebzehn ausgeschriebene Stellen enthielt. Davon wurden zwölf Inserate mit direktem Bezug zu Werkzeugbau, Werkzeugunterhalt, Werkzeugkonstruktion oder Spritzgiessprojekten in die Auswertung aufgenommen. Fünf fachfremde Treffer wurden ausgeschlossen.
Ausgewertet wurde der Abschnitt «Ihr Profil» beziehungsweise «Anforderungen» oder «Qualifikationen». Alle Inserate wurden am Erhebungstag als PDF archiviert. Die vollständige Stichprobe, die Kompetenzmatrix und die Quellenangaben sind in Anhang aufgeführt. Es handelt sich um eine qualitative Vollerhebung der genannten Rubrik und nicht um eine im statistischen Sinn repräsentative Stichprobe.

6.6.2 Ergebnisse

Die Auswertung zeigt ein einheitliches Bild über alle vier untersuchten Rollenebenen hinweg: Werkstatt, Werkzeugunterhalt, Konstruktion und Projektleitung.

Als Grundausbildung wird in allen zwölf Inseraten eine mechanische Lehre verlangt: Werkzeugmacher, Polymechaniker oder Werkzeugmechaniker EFZ. Die höchste geforderte Weiterbildung ist der Techniker HF, der in fünf Inseraten genannt wird, davon in zwei als «von Vorteil».

Eine digitale Anforderung wird in vier von zwölf Inseraten überhaupt erwähnt, und ausschliesslich auf Anwenderebene: 3D-CAD, ein PLM-System sowie SAP- und MS-Office-Anwenderkenntnisse. Darüber hinausgehende Kompetenzen werden nicht verlangt.

Elektrotechnik, Sensorik, Mess- und Signaltechnik, Netzwerktechnik oder Datenauswertung werden in keinem der zwölf Anforderungsprofile gefordert. Weder zwingend noch als «von Vorteil» oder «idealerweise». Auswertung ausschliesslich des Abschnitts «Ihr Profil» / «Anforderungen» / «Qualifikationen».

Legende:
X = zwingend gefordert
(X) = «von Vorteil» / «idealerweise»
- = nicht genannt

Tabelle 3 - Kompetenzmatrix (Quelle siehe Anhang "Auswertung von Stelleninseraten"

Nr.	Mech. Grundbildung	Techniker HF	CAD	PLM / ERP	Elektro-technik	Sensorik	Mess-/Signal-technik	Netzwerk / IT	Daten-auswertung
1 Woertz	X	-	-	-	-	-	-	-	-
2 Presspart	X	(X)	-	-	-	-	-	-	-
3 Ypsomed SO	X	-	-	X	-	-	-	-	-
4 Ypsomed BE	X	(X)	-	X	-	-	-	-	-
5 SKS	X	X	-	-	-	-	-	-	-
6 PackSys	X	X	X	X	-	-	-	-	-
7 SPT Roth	X	-	-	-	-	-	-	-	-
8 Federnfabrik	X	X	X	-	-	-	-	-	-
9 GF	X	-	-	-	-	-	-	-	-
10 Sonova	X	-	-	-	-	-	-	-	-
11 IWIS	X	-	-	-	-	-	-	-	-
12 Sonceboz	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe	**12/12**	**5/12**	**2/12**	**3/12**	**0/12**	**0/12**	**0/12**	**0/12**	**0/12**

6.6.3 Lücke zwischen Aufgaben und Anforderungen

Aufschlussreicher als das Fehlen dieser Anforderungen ist der Vergleich mit den Aufgaben, die im selben Inserat beschrieben werden. In sechs der zwölf Inserate werden Tätigkeiten verlangt, die genau jene Kompetenzen voraussetzen, die im Anforderungsprofil nicht abgefragt werden.

So gehört bei der Projektleitung Spritzgusswerkzeuge der Ypsomed AG die Durchführung von Datenanalysen sowie die Pflege und Auswertung von Statistiken zu den Hauptaufgaben. Als digitale Anforderung werden SAP-Kenntnisse und gute Kenntnisse der Microsoft-Office-Anwendungen genannt. Die Fertigungsplanung am Standort Burgdorf umfasst das Ausarbeiten digitaler Zwillinge zu den Operationsplänen der Formteile, verlangt werden SAP-Anwenderkenntnisse. Bei der Presspart AG soll der Teamleiter Werkzeugunterhalt ein präventives Wartungssystem einführen und weiterentwickeln sowie Budget- und KPI-Verantwortung tragen. Das Anforderungsprofil nennt eine abgeschlossene Lehre und Führungskompetenz. Vergleichbare Diskrepanzen finden sich bei Georg Fischer, Sonova und IWIS, wo Störungsanalyse, Mängelanalyse sowie das Einstellen, Ausmessen und Anfahren von Werkzeugen im Produktionsprozess zu den Aufgaben gehören, ohne dass dafür mess- oder datentechnische Kompetenz vorausgesetzt wird.

Die Branche erwartet von diesen Rollen also bereits heute Zustandsbeurteilung, Störungsanalyse und Datenarbeit, rekrutiert dafür aber weiterhin rein mechanisch.

6.6.4 Kontrollfälle

Besonders deutlich wird dies bei jenen drei Betrieben der Stichprobe, deren eigenes Produkt elektrischer oder mechatronischer Natur ist. Die Woertz AG beschreibt sich im Inserat als führend mit Spezialprodukten in der elektrotechnischen Branche und als Partner für Gesamtlösungen in der Gebäude-Elektroinstallation. Zu den Aufgaben des gesuchten Werkzeugmachers gehört die Inbetriebnahme der Werkzeuge in den Produktionslinien. Verlangt wird eine abgeschlossene Ausbildung als Werkzeugmacher oder einer ähnlichen mechanischen Ausbildung (Woertz AG, 2026).

Die Sonceboz Automotive S.A. bezeichnet sich als führendes Schweizer Unternehmen in der Entwicklung mechatronischer Antriebssysteme. Die ausgeschriebene Stelle umfasst die Wartung der Formen und deren Heisskanalsysteme. Gefordert werden ein EFZ als Polymechaniker sowie ausgezeichnete manuelle Fähigkeiten und Erfahrung in der Feinmechanik (Sonceboz Automotive S.A., 2025).
Auch bei der iwis e-tec GmbH bleibt das Profil auf die Stanz- und Umformtechnik beschränkt (IWIS AG, 2026).

Die betrachteten Stelleninserate verlangen überwiegend mechanische Kompetenzen; elektrotechnische und netzwerktechnische Anforderungen werden in den ausgewerteten Profilabschnitten nicht ausdrücklich genannt. Daraus folgt nicht, dass Beschäftigte diese Fähigkeiten nicht besitzen oder entsprechende Aufgaben im Unternehmen grundsätzlich nicht wahrnehmen.

6.6.5 Schlussfolgerung für das System

Aus dieser Auswertung ziehe ich die Schlussfolgerung, dass elektrotechnische, sensorische und netzwerktechnische Kompetenzen beim späteren Anwender des Systems nicht vorausgesetzt werden dürfen. Die Fähigkeiten, auf die sich das System stützen kann, sind mechanisches Verständnis, Erfahrung im Umgang mit technischen Unterlagen und die Bedienung parametrierbarer Maschinen.

Die qualitative Auswertung unterstützt die Entscheidung, den Prototyp ohne vorausgesetzte elektrotechnische oder netzwerktechnische Spezialkenntnisse bedienbar zu gestalten. Sie begründet insbesondere verständliche Fachbegriffe (W02), einen vereinfachten Netzwerkzugang (W04), verwechslungssichere Anschlüsse (W08) und vorkonfektionierte Kabel (W10). Die Auswertung erfasst aber ausschliesslich ausdrücklich genannte Anforderungen aus zwölf Stellenprofilen; sie ist keine Kompetenzmessung der Mitarbeitenden und kann weder allgemeine Verfügbarkeit von IT-Rollen noch Marktakzeptanz beweisen. Für die Systemfunktion wird die Interpretation der Rohsignale deshalb möglichst in der Firmware vorgenommen; der Anwender soll Ereignisse im Kontext seines Werkzeugs beurteilen können.

7 Bewertungsmethodik

Bevor in den folgenden Kapiteln Varianten verglichen und bewertet werden, muss definiert sein, nach welchen Kriterien die Bewertung erfolgt und wie deren Gewichtung zustande kommt. Die Methodik wird einmalig erarbeitet und dann auf alle Variantenentscheide angewendet.

7.1 Definition der Bewertungsmerkmale

Die folgenden Merkmale werden für die Bewertung aller Varianten herangezogen:

Merkmal	Definition im Sinne dieser Arbeit
Benutzerfreundlichkeit	Aufwand, den ein Anwender mit dem in Kapitel 6.6 dokumentierten Profil benötigt, um die Variante anzuschliessen, in Betrieb zu nehmen und im Fehlerfall zu beurteilen. Bewertet werden Anzahl Handgriffe bis zur Betriebsbereitschaft, Verwechslungssicherheit der Anschlüsse und Verständlichkeit der Rückmeldung ohne elektrotechnische oder IT-Vorkenntnis.
Kosten	Beschaffungskosten der Variante in CHF inkl. Versand, bezogen auf Stückzahl 1 und gemessen am Materialbudget von CHF 300 gemäss Pflichtenheft.
Anzahl Einzelteile	Anzahl separat zu beschaffender, zu montierender und zu verbindender Teile der Variante inkl. Kabel, Stecker und Adapter. Dient als Mass für Montageaufwand, Stücklistenlänge und Anzahl potenzieller Fehlerstellen.
Komponentenverfügbarkeit	Beschaffbarkeit über gängige Lieferanten, bei denen auch als Privatperson bestellt werden kann. Bewertet werden Lieferzeit, Anzahl verfügbarer Bezugsquellen und Verfügbarkeit eines gleichwertigen Ersatztyps.
Robustheit	Eignung der Variante für den jeweils tatsächlich vorgesehenen Einbauort am Werkzeug: dort auftretende Temperatur, Feuchtigkeit, Vibration, Stossbelastung sowie Staub- und Öleinwirkung. Temperaturen von bis zu 120 °C können in der Werkzeugumgebung auftreten; daraus folgt nicht, dass die gesamte Elektronik bei 120 °C montiert werden darf. Der realisierte Prototyp ist gemäss Kapitel 10.2 bezüglich des Ladebetriebs auf einen geeigneten kühleren Montageort angewiesen.
Erweiterbarkeit	Reserve der Variante für spätere Ergänzungen ohne Neuentwurf: freie Ein- und Ausgänge, freie Schnittstellen, verfügbarer Programm- und Datenspeicher sowie Möglichkeit eines Firmware-Updates. Relevant für die Nachnutzung durch Dritte gemäss Pflichtenheft.
Genauigkeit	Messabweichung der Variante im relevanten Messbereich und deren Auswirkung auf die Ereigniserkennung. Massgebend ist, ob die Toleranz die in Kapitel 6.4.3 hergeleitete Schwellenwertbetrachtung trägt.

7.2 Präferenzmatrix (Bleistiftmethode)

Die im vorangehenden Kapitel definierten Bewertungsmerkmale sind nicht alle gleich wichtig. Ohne begründete Gewichtung bliebe jeder Variantenentscheid angreifbar, weil der Einwand im Raum stehen könnte, die Gewichte seien nachträglich so gewählt worden, dass die ohnehin bevorzugte Variante gewinnt. Die Gewichtung wird deshalb vollständig abgeschlossen, bevor die erste Variante bewertet wird, und sie wird mit einer Methode ermittelt, die das Ergebnis nicht aus einer Gesamtansicht, sondern aus vielen einzeln dokumentierten Paarentscheiden erzeugt.

Gewählt wurde der Paarvergleich, auch Bleistiftmethode genannt. Jedes Merkmal wird genau einmal mit jedem anderen verglichen. Die Frage lautet dabei ausschliesslich: «Ist A wichtiger als B, oder B wichtiger als A?» Das jeweils wichtigere Merkmal wird in die entsprechende Zelle der Dreiecksmatrix eingetragen. Es werden keine Punkte vergeben, keine Abstufungen der Wichtigkeit vorgenommen und keine Gleichstände zugelassen. Genau diese Reduktion ist der Zweck der Methode: Der einzelne Entscheid wird trivial, und die Rangfolge entsteht erst in der Auswertung. Sie ist damit ein Ergebnis und keine Vorgabe.

Bei n = 7 Merkmalen ergeben sich:

$$\frac{n \cdot (n-1)}{2} = \frac{7 \cdot 6}{2} = 21\ Einzelvergleiche$$

Der praktische Vorteil liegt darin, dass nie sieben Merkmale gleichzeitig gegeneinander abgewogen werden müssen, da das erfahrungsgemäss in einer Rangliste nach Bauchgefühl endet. Stattdessen werden 21-mal zwei Merkmale gegeneinander gestellt.

7.2.1 Auswertung

Aus der ausgefüllten Matrix wird für jedes Merkmal ausgezählt, wie oft es als das wichtigere genannt wurde. Dabei gibt es die folgenden Bedeutungen:
M = modifizierte Gewichtung des Ziels (gerundet)
G = prozentuale Gewichtung des Ziels (gerundet)
R = Rangreihenfolge der Ziele
N = Anzahl der Nennungen des Ziels im paarweisen Vergleich

M	G	R	N	Nr.	Ziele
26	28	1	6	A	Benutzerfreundlichkeit
18	19	2	4	B	Kosten
12	10	5	2	C	Anzahl Einzelteile
11	10	6	2	D	Komp. Verfügbarkeit
16	19	3	4	E	Robustheit
14	14	4	3	F	Erweiterbarkeit
3	0	7	0	G	Genauigkeit
100%	100%		21		

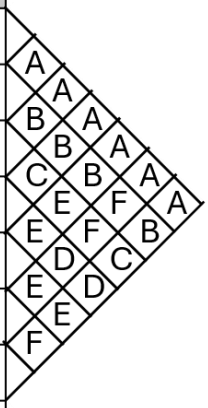


Abbildung 23 - Präferenzmatrix (eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 73)

Die Gewichtung G darf gemäss Führer und Züger (2024, S. 73) anschliessend modifiziert werden, solange die Rangfolge der Ziele und das Total von 100 % unverändert bleiben. Von dieser Möglichkeit wird hier aus zwei Gründen Gebrauch gemacht.

Erstens: Erhält die Genauigkeit in G das Gewicht null, weil sie keinen einzigen Direktvergleich gewinnt. Ein Merkmal mit dem Gewicht null ist faktisch aus der Bewertung entfernt: Eine Variante könnte darin beliebig schlecht abschneiden, ohne das Ergebnis zu beeinflussen. Das steht im Widerspruch dazu, dass das Merkmal zuvor bewusst als relevant definiert wurde.

Zweitens: Erzeugt G bei gleicher Nennungszahl identische Werte, hier bei Kosten und Robustheit sowie bei Anzahl Einzelteile und Komponentenverfügbarkeit. Die Rangfolge unterscheidet diese Paare bereits, weil der Direktvergleich in der Matrix vorliegt. In den Gewichten ginge diese Information verloren, und ein Variantenentscheid, der genau an einem dieser beiden Paare hängt, bliebe unentschieden.

Die modifizierten Werte in Spalte M bilden deshalb jeden Rang mit einem eigenen Gewicht ab. Für alle nachfolgenden Variantenbewertungen wird M verwendet. Die Spalte G bleibt als direktes Abbild der Nennungen in der Tabelle stehen, damit die Herleitung nachvollziehbar ist.

Dadurch ergibt sich die Auflistung in folgender Reihenfolge:

1. Benutzerfreundlichkeit 26 %
2. Kosten 18 %
3. Robustheit 16 %
4. Erweiterbarkeit 14 %
5. Anzahl Einzelteile 12 %
6. Komponentenverfügbarkeit 11 %
7. Genauigkeit 3 %

Führer und Züger (2024, S. 73) beschreiben die Präferenzmatrix als Froschperspektive, weil die Gewichtung aus Detailvergleichen auf der untersten Ebene entsteht und nach oben verdichtet wird. Auf eine stufenweise Gewichtung aus der Vogelperspektive als Gegenprobe wurde aus Aufwandsgründen verzichtet. Die 21 Vergleiche wurden vor der Variantenbewertung vom Verfasser durchgeführt und dokumentieren dessen projektbezogene Prioritäten. Sie reduzieren die Gefahr einer nachträglichen Anpassung an ein gewünschtes Variantenresultat, ersetzen jedoch weder eine unabhängige Expertengewichtung noch eine Sensitivitätsanalyse. Die modifizierten Gewichte M verändern die ursprüngliche Nennungshäufigkeit gezielt, damit kein Kriterium mit 0 % gewichtet wird. Der damit verbundene Ermessensentscheid wird transparent ausgewiesen.

Das Ergebnis deckt sich mit der Annahme aus der Praxis: Benutzerfreundlichkeit und Kosten stehen auf den ersten beiden Rängen; die Gewichtung wurde vor der ersten Variantenbewertung festgelegt. Dass die Genauigkeit den letzten Rang belegt, widerspricht der Erwartung an ein Messgerät nur scheinbar. Die Sensorgenauigkeit wurde bei der Komponentenwahl als nachrangiges Unterscheidungsmerkmal gewichtet. Die beispielhafte Fehlerfortpflanzung in Kapitel 6.4.3 ergibt für den betrachteten Arbeitspunkt rund +0.65 °C Abstandsfehler. Daraus lässt sich keine allgemeine Fehlergrenze im gesamten Betriebsbereich ableiten; insbesondere bleibt der thermische Einbaufehler unbeurteilt.6.4.2

8 Systemkonzept

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 4).

Jede Entscheidung in diesem Kapitel wird anhand der Bewertungsmethodik aus dem vorherigen Kapitel begründet. Wo Varianten verglichen werden, wird das feste Vergleichsraster (Bezeichnung, Schnittstelle, Funktionsprinzip, Vor-/Nachteile, Preis) aus der Transferarbeit verwendet.

8.1 Vorgehen

Die in Kapitel 7 ermittelte Gewichtung der Bewertungsmerkmale bildet den Massstab für alle Entscheide dieses Kapitels. Vier Randbedingungen schränken den Lösungsraum jedoch bereits vor jeder Bewertung ein. Sie werden hier offengelegt, damit später nachvollziehbar bleibt, welche Optionen aus einer Vorgabe ausscheiden und welche aufgrund der Bewertung.

Materialbudget: Gemäss Aufgabenstellung stehen CHF 300 zur Verfügung. Lösungen, die dieses Budget allein durch eine Einzelkomponente zu stark belasten, werden nicht weiterverfolgt.

Beschaffung als Privatperson: Nach Pflichtenheft müssen sämtliche Komponenten ohne Firmenkonto beziehbar sein. Industriekomponenten, die ausschliesslich über Fachhandel mit Firmennachweis erhältlich sind, scheiden damit aus.

Logikpegel: Das System arbeitet durchgehend mit 3.3V oder 5V Logik und kann weder 24-V-Signale erzeugen noch verarbeiten. Diese Festlegung wirkt sich auf die Wahl der Sensorik und des Steckersystems aus.

Vorhandene Einarbeitung: Bei 216 geplanten Bearbeitungsstunden ist die Einarbeitung in eine unbekannte Plattform ein Projektrisiko. Wo zwischen technisch gleichwertigen Optionen zu entscheiden ist und für eine davon Erfahrung aus einer früheren Arbeit vorliegt, wird dies als Argument der Projektsicherheit gewertet. Es fliesst nicht in die Merkmalsbewertung ein, sondern wird beim betroffenen Entscheid gesondert benannt.

8.2 Systemarchitektur

Das System ist als eigenständiges Edge-Device konzipiert. Es erfasst, verarbeitet und speichert sämtliche Daten lokal auf dem Gerät. Eine Netzwerkverbindung ist für den Grundbetrieb nicht erforderlich (Festanforderung F09).

Diese Architekturentscheidung ist nicht technisch, sondern regulatorisch begründet. In der Medizintechnik, dem Umfeld, aus dem die Problemstellung dieser Arbeit stammt, unterliegt die Anbindung von Produktionsgeräten an externe Netzwerke den IT-Security-Vorgaben des Betriebs. Die eigene Erfahrung von sieben Jahren bei der Ypsomed AG zeigt, dass die Freigabe einer Cloud-Anbindung für produktionsnahe Geräte regelmässig an diesen Vorgaben scheitert. Das System muss daher ohne Internetverbindung vollständig funktionsfähig sein. Die Möglichkeit einer optionalen Datenübertragung per WLAN wird als Wunschanforderung (W03) berücksichtigt, ist aber keine Voraussetzung für den Betrieb.

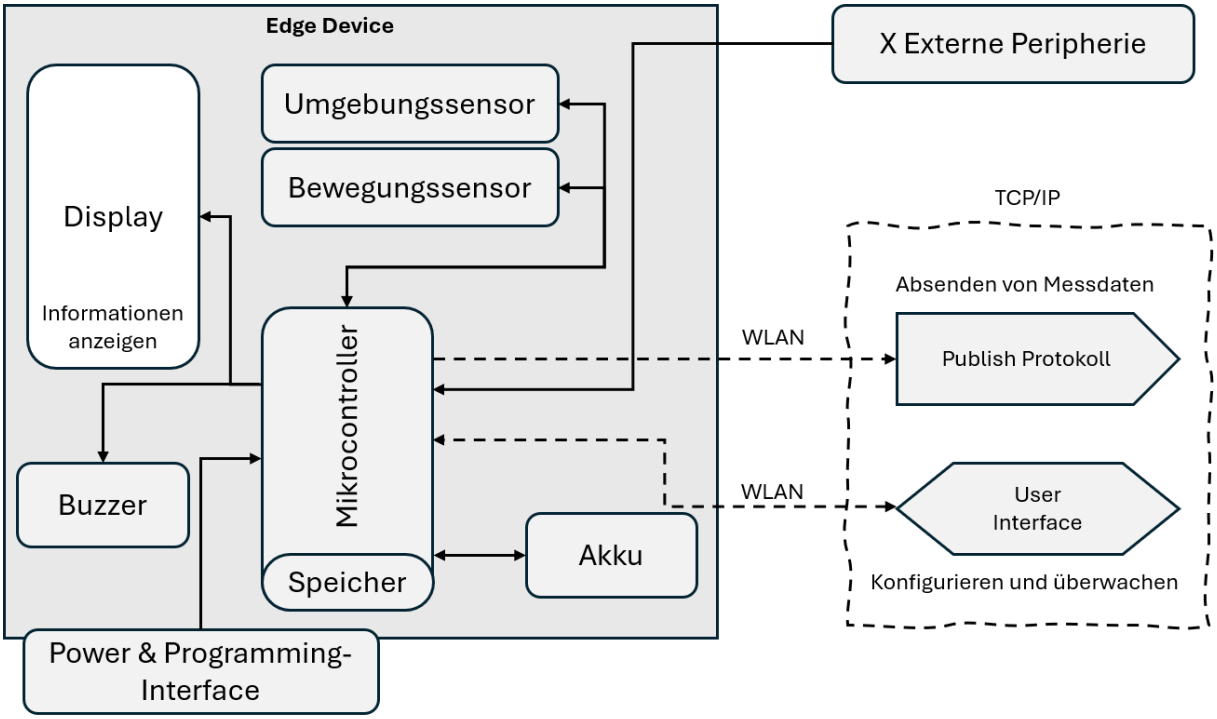


Abbildung 24 - Blockdiagramm Systemarchitektur (Quelle: Eigene Darstellung)

Abbildung 24 - Blockdiagramm Systemarchitektur zeigt die Verbindungen der einzelnen Systembereiche miteinander. Durchgezogenen Linien kennzeichnen Komponenten und Verbindungen, die für den Grundbetrieb erforderlich sind (Festanforderungen). Die gestrichelten Linien kennzeichnen optionale Erweiterungen (Wunschanforderungen).

Edge-Device (grauer Bereich)
Das Sensor-Modul bildet die physische Einheit, die dauerhaft am Werkzeug verbleibt. Der Mikrocontroller ist die zentrale Verarbeitungseinheit. Er liest die Sensoren aus, berechnet abgeleitete Grössen wie den Taupunkt (siehe Kapitel 6.4), erkennt Ereignisse und schreibt diese auf den internen Speicher.

Umgebungssensor
Erfasst Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Werkzeugumgebung (F01). Die Messwerte dienen als Eingangsgrössen für die Taupunktberechnung und die Kondensationsrisiko-Erkennung (F03).

Bewegungssensor
Erfasst Beschleunigungswerte und erkennt mechanische Schocks über einen definierten Schwellenwert (F02). Zusätzlich werden digitale Eingänge für die Erkennung von Werkzeugbewegungen bereitgestellt, aus denen Produktionsblöcke und Zykluszeiten abgeleitet werden (F04).

Externe Peripherie
Die digitalen Eingänge für die Werkzeugbewegungserkennung (F04) sind als einzige Komponente ausserhalb des Edge-Device angeordnet. Der Anschluss erfolgt über konfigurierbare Eingänge am Sensor-Modul wird in Kapitel 8.4 behandelt.

Speicher
Sämtliche Ereignisse werden eventbasiert auf internem Speicher protokolliert. Die Speicherarchitektur stellt sicher, dass mindestens 48 Stunden rückwirkend verfügbare Daten vorliegen (F05). Das Konzept wird in Kapitel 8.7 detailliert beschrieben.

Display
Zeigt den aktuellen Zustand des Systems und dient als Ausgabegerät für die Inbetriebnahme und Konfiguration (F07). Das Display ist bewusst als reines Anzeigegerät ohne Touchfunktion konzipiert. Die Konfiguration erfolgt stattdessen über das WLAN-Interface auf einem Gerät, das der Anwender bereits besitzt und bedienen kann; ein Smartphone oder ein Laptop. Dieser Entscheid folgt aus der Zielgruppenanalyse in Kapitel 6.6: Die dokumentierten Berufsprofile im Werkzeugbau setzen den Umgang mit Smartphones und Browsern voraus, nicht aber die Bedienung von Touchdisplays in eingebetteten Systemen.

Buzzer
Erzeugt ein akustisches Warnsignal, wenn das Werkzeug eingelagert wird, ohne dass eine dauerhafte Energieversorgung sichergestellt ist (W06).

Akku
Ermöglicht die unterbrechungsfreie Überwachung während Transport, Rüsten und Lagerung, wenn das System nicht kabelgebunden mit Energie versorgt ist (W05). Im Produktionsbetrieb erfolgt die Energieversorgung kabelgebunden (F08).

Power & Programming-Interface
USB-C-Schnittstelle für die Energieversorgung im Produktionsbetrieb und für Firmware-Updates. Dient gleichzeitig als Ladeschnittstelle für den Akku.

WLAN-Funktionen (gestrichelter Bereich)
Die beiden optionalen WLAN-Funktionen sind voneinander unabhängig. Das Publish-Protokoll überträgt Messdaten und Ereignisse an ein externes Backend-System (W03). Das User Interface stellt ein Captive Portal bereit, über das der Anwender das System konfigurieren und überwachen kann, ohne eine IP-Adresse eingeben zu müssen (W04, F07). Beide Funktionen setzen eine WLAN-Verbindung voraus und sind daher als Wunschanforderungen eingestuft. Mit Ausnahme der Grundkonfiguration über das Display, die auch ohne externes WLAN möglich bleibt.

8.3 Hardwareplattform - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller

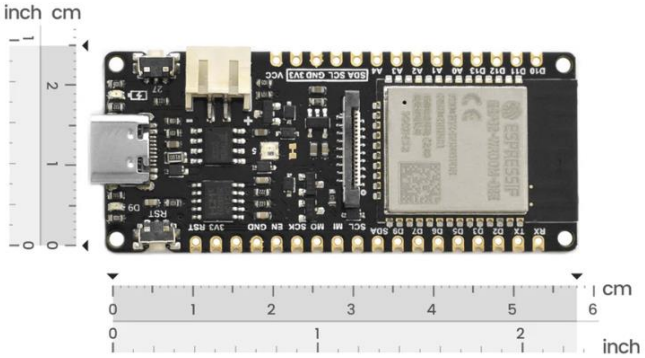


Abbildung 25 - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller (Quelle DFRobot, o.D.)

Die Hardwareplattform bestimmt die verfügbaren Schnittstellen, den Speicher, die Rechenleistung und das Ökosystem für alle nachfolgenden Entscheide. Die Wahl erfolgt nicht über die gewichtete Bewertungsmatrix aus Kapitel 7, da deren Merkmale (Benutzerfreundlichkeit beim Anschliessen, Messabweichung, Robustheit im Einsatz) auf Peripheriekomponenten zugeschnitten sind und bei einem Mikrocontroller-Board nicht als Ausschlusskriterium differenzieren. Stattdessen wird ein Anforderungsabgleich durchgeführt: Die technischen Anforderungen, die sich aus der Systemarchitektur (Kapitel 8.2) und dem Pflichtenheft (Kapitel 4.1) ergeben, werden gegen die Eigenschaften des gewählten Boards geprüft.

8.3.1 Ausgangslage

Die in Kapitel 8.1 deklarierte Randbedingung «Vorhandene Einarbeitung» ist für die Plattformwahl der entscheidende Faktor. Ich habe im Rahmen der Transferarbeit «Pflanzenbewässerungssystem mit RTOS» im Fach Microcomputer über ein Semester mit dem FireBeetle 2 ESP32-E (DFRobot, SKU DFR0654) gearbeitet. Die dort gewonnene Erfahrung umfasst die Toolchain (Arduino IDE, ESP32-Board-Support), die Pin-Eigenheiten des ESP32 (Strapping-Pins, ADC-Einschränkungen bei aktivem WiFi), die I2C- und SPI-Anbindung von Sensoren sowie die WiFi-Funktionalität. Bei 216 geplanten Bearbeitungsstunden neben Beruf und Branchenwechsel (vgl. Risiko R7, Kapitel 3.6) wäre die Einarbeitung in eine unbekannte Plattform ein vermeidbares Projektrisiko.

Die nachfolgende Prüfung stellt sicher, dass diese pragmatische Wahl die technischen Anforderungen tatsächlich erfüllt.

8.3.2 Anforderungsabgleich

Die linke Spalte listet die Anforderung aus dem Pflichtenheft oder der Systemarchitektur. Die rechte Spalte zeigt, wie der FireBeetle 2 ESP32-E diese Anforderung erfüllt.

Tabelle 4 - Anforderungsabgleich für Hardwareplattform

Anforderung	Quelle	Erfüllungsgrad der Anforderung	Status
WiFi für Captive Portal und optionale Datenübertragung	F07 W03 W04	ESP32-WROOM-32E mit integriertem WiFi 802.11 b/g/n. Access-Point-Modus und Station-Modus gleichzeitig möglich. In der Transferarbeit bereits erprobt.	Erfüllt
I2C-Bus für Umgebungssensor und Bewegungssensor	F01 F02	Hardware-I2C auf GPIO21 (SDA) und GPIO22 (SCL). Mehrere Geräte am selben Bus möglich.	Erfüllt
SPI-Bus für Display	F07	Hardware-SPI auf GPIO18 (SCK), GPIO23 (MOSI), GPIO19 (MISO).	Erfüllt
Mindestens 4 konfigurierbare digitale Eingänge	F04	10 freie GPIOs nach Abzug der belegten Pins für Display, Sensoren, Buzzer und Interrupt. Detaillierte Pinzuordnung folgt in Kapitel 8.5.	Erfüllt
Interrupt-fähiger GPIO für Schockerkennung	F02	Alle GPIOs des ESP32 sind interrupt-fähig. Der Bewegungssensor kann über einen Hardware-Interrupt ein Schock-Ereignis melden, ohne dass	Erfüllt

Anforderung	Quelle	Erfüllungsgrad der Anforderung	Status
		der Mikrocontroller den Sensor permanent abfragen muss.	
Ausreichend Flash-Speicher für Firmware und Eventlog	F05	4 MB Flash. Davon steht nach Abzug der Firmware ein konfigurierbarer Bereich für das SPIFFS/LittleFS-Dateisystem zur Verfügung. Die Berechnung der erreichbaren Speicherkapazität erfolgt in Kapitel 8.7.	Erfüllt
Integrierte Akkuladeelektronik	W05	Onboard-Laderegler mit JST-PH-2.0-Anschluss für LiPo-Akkus. Laden über USB-C, automatische Umschaltung zwischen USB- und Akkubetrieb. Keine externe Ladeschaltung erforderlich.	Erfüllt
USB-Schnittstelle für Energieversorgung und Programmierung	F08	USB-C mit integriertem USB-to-Serial-Wandler (CH340C). Dient gleichzeitig als Power-Interface im Produktionsbetrieb, als Programmier-Schnittstelle und als Ladeanschluss.	Erfüllt
Echtzeitfähigkeit für Ereigniserkennung	F02 F03	Dual-Core Xtensa LX6, 240 MHz. FreeRTOS als Betriebssystem möglich. Ausreichend für die parallele Verarbeitung von Sensorabfragen, Displayaktualisierung und WiFi. In der Transferarbeit mit FreeRTOS-Tasks validiert.	Erfüllt
Preis innerhalb des Materialbudgets	W07	13.90 CHF bei der Bastelgarage. Bei einem Budget von CHF 300 für den gesamten Prototyp belastet die Plattform das Budget mit weniger als 5%.	Erfüllt
Beschaffung als Privatperson	W09, (8.1)	Erhältlich bei der Bastelgarage (bastelgarage.ch), einem Schweizer Händler, der ohne Firmenkonto an Privatpersonen liefert. Lieferzeit 1-3 Werktage. Alternativ direkt bei DFRobot oder über Distrelec beziehbar.	Erfüllt

8.3.3 Einschränkungen

Kein System ist ohne Kompromisse. Folgende bekannte Einschränkungen des FireBeetle 2 ESP32-E sind für dieses Projekt relevant:

GPIO34 Doppelbelegung

Der onboard-Spannungsteiler für die Akkumessung liegt auf GPIO34. Derselbe Pin wird für den Interrupt des Bewegungssensors benötigt. Diese Kollision wurde während der Realisierung erkannt und wird in Kapitel 14.1 als Lesson Learned dokumentiert.

ADC2 nicht nutzbar bei aktivem WiFi

Die zweite ADC-Einheit des ESP32 ist bei aktivem WiFi blockiert. Alle analogen Messungen müssen über ADC1 (GPIO32-39) erfolgen. Für dieses Projekt ist dies keine Einschränkung, da die Sensorik ausschliesslich über I2C angebunden ist und die digitalen Eingänge keine ADC-Funktion benötigen.

Kein Hardware-Schutz gegen Spannungsabriss

Der ESP32 besitzt keine integrierte Erkennung für Unterspannung (Brown-Out Detection ist konfigurierbar, aber nicht mit garantierter Datensicherung).

8.3.4 Entscheid

Der FireBeetle 2 ESP32-E erfüllt sämtliche technischen Anforderungen aus dem Pflichtenheft. Die integrierte Akkuladeelektronik, das WiFi-Modul und die USB-C-Schnittstelle decken drei Funktionen ab, die bei anderen Boards als separate Zusatzkomponenten beschafft und verdrahtet werden müssten. Dies reduziert die Anzahl Einzelteile, die Fehlerquellen und die Kosten. Die Wahl stützt sich zusätzlich auf die in Kapitel 8.1 deklarierte Randbedingung: Die vorhandene Einarbeitung aus der Transferarbeit eliminiert das Projektrisiko einer unbekannten Plattform und ermöglicht den sofortigen Beginn der Realisierungsphase.

8.4 Sensorik

Die Sensorik ist das Bindeglied zwischen der physischen Umgebung des Werkzeugs und der digitalen Verarbeitung im Mikrocontroller. Dieses Kapitel legt fest, welche Sensoren für die drei Messgrössen Temperatur/Luftfeuchtigkeit, mechanische Beschleunigung und Werkzeugbewegung eingesetzt werden. Die Auswahl erfolgt über die gewichtete Bewertungsmatrix aus Kapitel 7 mit den sieben Merkmalen und ihrer Gewichtung aus der Präferenzmatrix.

8.4.1 Festlegung: Durchgängiges Sensor-Ökosystem

Bevor die einzelnen Sensortypen bewertet werden, wird eine übergeordnete Festlegung getroffen, die den Lösungsraum für alle nachfolgenden Vergleiche eingrenzt.

Die in Kapitel 8.3 gewählte Hardwareplattform FireBeetle 2 ESP32-E stammt von DFRobot. Derselbe Hersteller bietet unter der Marke «Gravity» ein Ökosystem aus Sensoren, Aktoren und Kabeln an, das auf einem einheitlichen Steckerstandard basiert: JST PH 2.0 mm, 3- oder 4-polig, mit optional vorkonfektionierten Kabeln. Die Schnittstelle für Sensoren ist üblicherweise I2C.

Für die vorliegende Arbeit bietet dieses Ökosystem vier Vorteile, die sich direkt auf die Bewertungskriterien aus Kapitel 7 auswirken:

1. Der einheitliche Stecker reduziert die Komplexität beim Anschliessen. Alle Sensoren verwenden denselben JST-PH-2.0-Stecker und dieselben vorkonfektionierten Kabel. Löten und Crimpen entfallen wo möglich. Das betrifft direkt das Merkmal «Benutzerfreundlichkeit»

2. Das durchgängige Ökosystem verringert die Anzahl verschiedener Einzelteile. Es gibt einen Kabeltyp, einen Steckertyp und eine Schnittstelle (I2C). Das betrifft das Merkmal «Anzahl Einzelteile».

3. Sämtliche Gravity-Komponenten sind bei der Bastelgarage (bastelgarage.ch) als Privatperson bestellbar, ohne Firmenkonto und mit Lieferzeit von wenigen Werktagen innerhalb der Schweiz. Das betrifft das Merkmal «Komponentenverfügbarkeit».

4. Die Kompatibilität ist zwischen dem FireBeetle-Board und den Gravity-Sensoren vom selben Hersteller dokumentiert und in der Transferarbeit bereits validiert. I2C als durchgängige Schnittstelle bedeutet: Alle Sensoren teilen sich denselben Bus mit nur zwei Datenleitungen (SDA, SCL).

Bedeutung der Festlegung

In den nachfolgenden Variantenvergleichen werden nur Sensoren berücksichtigt, die über I2C ansprechbar sind und entweder im Gravity-Ökosystem verfügbar oder mit vertretbarem Aufwand daran anbindbar sind. Sensoren mit analogem Ausgang, proprietärem Protokoll oder industriellem Signalpegel (4-20 mA, 0-10 V) scheiden aus der Randbedingung in Kapitel 8.1 (Logikpegel 3.3 V) bereits aus.

8.4.2 Messintervalle und Erfassungsstrategie

Bevor die konkreten Sensoren verglichen werden, wird definiert, welche Messgrössen in welchem Intervall erfasst werden müssen. Diese Festlegung bestimmt, welche technischen Eigenschaften ein Sensor mitbringen muss. Insbesondere ob eine periodische Abtastung genügt oder eine interruptgesteuerte Erfassung zwingend ist.

Die drei Messgrössen unterscheiden sich grundlegend in ihrem physikalischen Änderungsverhalten:

Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Diese sind träge Grössen. Die Umgebungstemperatur in einem Hochregallager ändert sich typischerweise über Stunden, nicht Sekunden. Selbst beim Rüsten, wenn das Werkzeug von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur kommt, dauert der Temperaturanstieg Minuten bis zu Stunden. Eine periodische Abtastung ist daher ausreichend.

Mechanische Schocks

Diese sind Einzelereignisse. Ein Schlag oder Stoss dauert Millisekunden. Zwischen zwei periodischen Abtastungen wäre das Ereignis unwiederbringlich verloren. Hier ist eine interruptgesteuerte Erfassung zwingend: Der Sensor muss die Schwellenwertüberschreitung selbst erkennen und per Hardware-Interrupt an den Mikrocontroller melden. Kein Schock-Ereignis darf verloren gehen.

Werkzeugbewegungen (Schliesszyklen)
Dies sind zyklische Ereignisse. Die kürzeste zu erwartende Zykluszeit bestimmt die minimale Reaktionszeit. Auch hier ist eine interruptgesteuerte Erfassung (Flankenerkennung am digitalen Eingang) die richtige Strategie, da eine periodische Abtastung bei schnellen Zyklen Ereignisse verpassen könnte.

Die folgende Tabelle fasst die Erfassungsstrategie zusammen:

Tabelle 5 - Messgrössen und deren Einfluss auf das Gesamtsystem

Messgrösse	Physikalisches Verhalten	Erfassungsstrategie	Begründung
Temperatur / Luftfeuchtigkeit	Träge (Änderung über Minuten bis Stunden)	Periodische Abtastung	Hohe Abtastrate unnötig. Genauigkeit und Robustheit sind wichtiger als Geschwindigkeit.
Mechanischer Schock	Einzelereignis (Millisekunden)	Interruptgesteuert (Hardware-Interrupt des Sensors)	Sensor erkennt Schwellenwert autonom. Kein Ereignis darf verloren gehen.
Werkzeugbewegung (Schliesszyklus)	Zyklisch (kürzeste Zykluszeit als Grenzwert)	Interruptgesteuert (Flanke am digitalen Eingang)	Schnelle Zyklen erfordern lückenlose Erkennung jeder Flanke.

Festlegung
Die Konsequenz für die Sensorwahl ist klar: Der Umgebungssensor muss keine hohe Abtastrate liefern. Eigenschaften wie Robustheit sind wichtiger als Geschwindigkeit. Der Beschleunigungssensor dagegen muss einen Hardware-Interrupt mit konfigurierbarem Schwellenwert bieten. Ein Sensor, der nur periodisch abgefragt werden kann, ist für die Schockerkennung ungeeignet, unabhängig von seiner Genauigkeit oder seinem Preis.

8.4.3 Temperatur und Luftfeuchtigkeit



Abbildung 26 - Gravity BME280
(Quelle: Bastelgarage.ch o.D.)



Abbildung 27 - Gravity AHT20
(Quelle: Bastelgarage.ch o.D.

Anforderungen aus dem Pflichtenheft
Der Sensor muss Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Werkzeugumgebung erfassen (F01). Die Messwerte dienen als Eingangsgrössen für die Taupunktberechnung (F03, Kapitel 6.4). Aus der Schwellenwertbetrachtung in Kapitel 6.4.2 ergibt sich die maximale zulässige Messunsicherheit: Der Schwellenwert für das Kondensationsrisiko liegt bei $\Delta T \leq 3$ °C zwischen der gemessenen Raumtemperatur und dem Taupunkt. Die kombinierte Sensortoleranz darf diesen Schwellenwert nicht aufzehren.

Zusätzlich ergibt sich aus der Festlegung auf das Gravity-Ökosystem die Randbedingung, dass der Sensor über I2C ansprechbar sein und vorzugsweise über einen Gravity-Stecker verfügen muss.

Variantenvergleich
Im Gravity-Sortiment von DFRobot sind zwei Sensoren verfügbar, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit über I2C messen und bei der Bastelgarage beschaffbar sind. Beide wurden als Varianten in den Vergleich aufgenommen.

Merkmal	**Variante A: Gravity BME280 (SEN0236)**	**Variante B: Gravity AHT20 (SEN0528)**
Hersteller Sensorchip	Bosch Sensortec (BME280)	ASAIR (AHT20)
Schnittstelle	I2C, Gravity 4-Pin JST PH 2.0	I2C, Gravity 4-Pin JST PH 2.0
Messgrössen	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck	Temperatur, Luftfeuchtigkeit
Messbereich Temperatur	−40 bis +85 °C	−40 bis +85 °C
Messbereich Feuchte	0-100 % rH	0-100 % rH
Genauigkeit Temperatur	±0.5 °C (bei 0-65 °C)	±0.3 °C
Genauigkeit Feuchte	±3 % rH (bei 20-80 % rH, lt. Bosch-Datenblatt)	±2 % rH
I2C-Adresse	Konfigurierbar: 0x76 oder 0x77 (per Lötbrücke)	Fest: 0x38
Betriebsspannung	3.3 V / 5 V	2-5 V
Stromaufnahme	ca. 2 mA (Messung), <1 µA (Sleep)	ca. 0.25 mA (Messung)
Messzyklusdauer	ca. 11.5 ms (bei Standard-Oversampling 1×/1×/1×)	ca. 80 ms Konvertierung; empfohlenes Minimum 1 s zwischen Messungen
Ansprechzeit Feuchte (τ63 %)	1 s	8 s
Ansprechzeit Temperatur (τ63 %)	Nicht separat spezifiziert (Messwert innerhalb des Messzyklus verfügbar)	5-30 s (abhängig von thermischer Anbindung des Substrats)
Besonderheit	Zusätzliche Luftdruckmessung; konfigurierbare I2C-Adresse erlaubt zwei Sensoren am selben Bus	Hohe Auflösung (0.01 °C / 0.024 % rH); feste Adresse verhindert zweiten Sensor am selben Bus
Preis (Bastelgarage)	CHF 17.90	CHF 7.90

Beide Sensoren erfüllen die Grundanforderung F01 und liefern die für die Taupunktberechnung benötigten Messgrössen. Die Unterschiede liegen im Detail:

Der BME280 von Bosch ist ein in der Maker-Community und im professionellen Umfeld breit eingesetzter Sensor. Seine Besonderheit im Vergleich zum AHT20 ist die zusätzliche Luftdruckmessung, die zwar keine Festanforderung darstellt, aber als Plausibilisierungsgrösse für die Umgebungsbedingungen nutzbar wäre. Die konfigurierbare I2C-Adresse (0x76 oder 0x77) ermöglicht es, zwei BME280-Sensoren am selben Bus zu betreiben, etwa um die Temperatur an zwei verschiedenen Stellen des Werkzeugs zu messen. Die Genauigkeit liegt bei ±0.5 °C für die Temperatur und ±3 % rH für die Luftfeuchtigkeit (gemäss Bosch-Datenblatt BME280). Einige Händler, darunter die Bastelgarage, geben ±2 % rH an; in dieser Arbeit wird der konservativere Datenblatt-Wert verwendet.

Der AHT20 von ASAIR ist ein reiner Temperatur-/Feuchtesensor ohne Druckmessung. Seine Genauigkeit ist mit ±0.3 °C und ±2 % rH etwas besser als die des BME280. Der Preis ist mit CHF 7.90 weniger als die Hälfte. Der entscheidende Nachteil ist die feste I2C-Adresse 0x38: Pro Bus kann nur ein AHT20 betrieben werden. Hinzu kommt eine deutlich längere Ansprechzeit: Die Feuchtemessung benötigt 8 Sekunden (τ63 %), die Temperaturmessung je nach thermischer Anbindung 5-30 Sekunden. Das Datenblatt empfiehlt zudem ein Messintervall von mindestens 1 Sekunde, um eine Eigenerwärmung des Sensors unter 0.1 °C zu halten. Für die träge Umgebungstemperatur im Werkzeugbau ist das kein K.O.-Kriterium, schränkt aber die Flexibilität bei höheren Abtastraten ein. Sollte in einer späteren Ausbaustufe ein zweiter Temperatursensor benötigt werden, müsste zudem ein separater I2C-Bus konfiguriert werden.

Variantenbewertung Temperatur und Luftfeuchtigkeitssensor

Die Bewertung erfolgt nach den sieben Merkmalen aus Kapitel 7 mit der Gewichtung aus der Präferenzmatrix. Die Bewertungsskala reicht von 1 (ungenügend) bis 5 (ausgezeichnet).

Merkmal	Gewichtung	BME280	Begründung	AHT20	Begründung
Benutzerfreundlichkeit	26 %	5	Gravity-Stecker, umfangreiche Arduino-Library, breite Community-Dokumentation. Bereits in der Transferarbeit validiert.	4	Gravity-Stecker, Arduino-Library vorhanden. Weniger Community-Ressourcen als der BME280, aber grundsätzlich einfach anzuschliessen.
Kosten	18 %	3	CHF 17.90. Im Prototyp-Budget vertretbar, aber mehr als doppelt so teuer wie die Alternative.	5	CHF 7.90. Günstigster Gravity-Umgebungssensor bei der Bastelgarage.
Robustheit	16 %	5	Bosch Sensortec - etablierter Hersteller mit langjährigem Track Record im Automotive- und Industriebereich. MEMS-Sensor mit bewährtem Design.	4	ASAIR - weniger etabliert als Bosch. Der AHT20 ist ein neueres Design. Keine Bedenken bezüglich Grundfunktion, aber weniger Langzeitdaten verfügbar.
Erweiterbarkeit	14 %	5	Konfigurierbare I2C-Adresse: zwei Sensoren am selben Bus möglich. Zusätzliche Luftdruckmessung als Erweiterungsoption.	3	Feste I2C-Adresse: nur ein Sensor pro Bus. Keine Zusatzfunktionen. Erweiterung auf zwei Messpunkte erfordert separaten Bus.

Merkmal	Ge-wich-tung	BME280	Begründung	AHT20	Begründung
Anzahl Einzelteile	12 %	5	1 Sensormodul + 1 Gravity-Kabel.	5	1 Sensormodul + 1 Gravity-Kabel.
Komponenten-verfügbarkeit	11 %	5	Bei der Bastelgarage, DFRobot und Distrelec verfügbar. Hohe Verbreitung sichert Nachlieferbarkeit.	5	Bei der Bastelgarage und DFRobot verfügbar.
Genauigkeit	3 %	4	±0.5 °C, ±3 % rH. Für die Schwellenwertbetrachtung (ΔT ≤ 3 °C) ausreichend, aber nicht die beste verfügbare Spezifikation.	5	±0.3 °C, ±2 % rH. Bessere Genauigkeit als der BME280, mehr Spielraum für die Schwellenwertbetrachtung.
Gewichtete Summe	**100%**	**4.61**		**4.30**	

Berechnung Variante A (BME280): 5×0.26 + 3×0.18 + 5×0.16 + 5×0.14 + 5×0.12 + 5×0.11 + 4×0.03 = 1.30 + 0.54 + 0.80 + 0.70 + 0.60 + 0.55 + 0.12 = **4.61**

Berechnung Variante B (AHT20): 4×0.26 + 5×0.18 + 4×0.16 + 3×0.14 + 5×0.12 + 5×0.11 + 5×0.03 = 1.04 + 0.90 + 0.64 + 0.42 + 0.60 + 0.55 + 0.15 = **4.30**

Die Bewertungsmatrix zeigt einen Vorsprung des BME280 von 0.31 Punkten. Der Unterschied entsteht vor allem durch die bessere Erweiterbarkeit (konfigurierbare I2C-Adresse) und die höhere Robustheitsbewertung (etablierter Hersteller). Der AHT20 punktet beim Preis und bei der Genauigkeit, kann die Nachteile bei der Erweiterbarkeit aber nicht ausgleichen.

Abgrenzung zur Messgenauigkeitsvalidierung
Eine messtechnische Validierung der Sensorgenauigkeit gegen ein kalibriertes Referenzinstrument wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Dies ist eine bewusste Abgrenzung, die auf zwei Überlegungen beruht.

Erstens - Kalibrierte Referenzinstrumente
Eine seriöse Genauigkeitsvalidierung würde kalibrierte Referenzinstrumente erfordern, deren Kosten das Materialbudget von CHF 300 für den gesamten Prototyp übersteigen. Ein Vergleich mit einem unkalibrierten Zweitsensor ersetzt keine Kalibrierung oder Rückführung, kann jedoch systematische Differenzen zwischen Einbaupositionen sichtbar machen. Die Genauigkeitswerte von ±0.5 °C und ±3 % rH stammen aus dem Datenblatt von Bosch Sensortec, einem etablierten Halbleiterhersteller, der seine Sensoren unter kontrollierten Bedingungen charakterisiert. Für die Auswahl werden zunächst die Herstellerangaben verwendet; die Eignung der gesamten Messanordnung muss davon getrennt beurteilt werden.

Zweitens - Sensor Positionierung
Der BME280 befindet sich im fertig aufgebauten System im Inneren des Gehäuses. Die Eigenerwärmung des Mikrocontrollers und der übrigen Elektronik beeinflusst die gemessene Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Der vom internen Sensor gelieferte Messwert weicht daher systembedingt von den tatsächlichen Umgebungsbedingungen ab, unabhängig von der Sensorgenauigkeit selbst. Aus diesem Grund wird auf dem Board eine zusätzliche I2C-Schnittstelle nach aussen geführt, über die ein zweiter BME280 ausserhalb des Gehäuses angeschlossen werden kann. Die konfigurierbare I2C-Adresse des BME280 (0x76 / 0x77) ermöglicht den Betrieb beider Sensoren am selben Bus. Der externe Sensor liefert dann die präzisen Raumwerte, während der interne Sensor die Temperatur im Geräteinneren überwacht. Der Anschluss für diese Erweiterung ist in Kapitel 10.1 (Schaltungsentwurf) berücksichtigt; die Auswertung eines zweiten Sensors ist in der Firmware dieser Version nicht umgesetzt.10.1

Entscheidung
Der DFRobot Gravity BME280 (SEN0236) wird als Umgebungssensor gewählt. Er erreicht in der gewichteten Bewertung 4.61 von 5 Punkten und liegt damit vor dem AHT20 (4.30 Punkte).

Ausschlaggebend sind drei Faktoren:

- Die konfigurierbare I2C-Adresse ermöglicht eine spätere Erweiterung auf zwei Messpunkte ohne Umbau des Bussystems.
- Die zusätzliche Luftdruckmessung bietet eine Erweiterungsoption, die keine Festanforderung darstellt, aber ohne Mehraufwand verfügbar ist.
- Die breite Verbreitung des Bosch BME280 in professionellen Anwendungen und in der Maker-Community stellt eine solide Basis für die Firmware-Entwicklung dar.

Die bessere Datenblattgenauigkeit des AHT20 (±0.3 °C vs. ±0.5 °C) ist gegenüber den für diesen Prototyp priorisierten Eigenschaften weniger ausschlaggebend; eine Validierung der gesamten Messkette wurde nicht durchgeführt. Der Preisunterschied von CHF 10.00 fällt bei einem Gesamtbudget von CHF 300 marginal ins Gewicht und wird akzeptiert. Bei einer späteren Kostenoptimierung kann ein AHT20 erneut geprüft werden. Obwohl beide Bauteile I^2C verwenden, erfordert ein Austausch die Kontrolle von Versorgung, elektrischer und mechanischer Belegung, Sensorbibliothek, Gerätekonfiguration und Gehäuseintegration. Für Kapitel 10.2 wird vorgemerkt, dass der Sensor so angeordnet wird, dass er mit geringem Aufwand im CAD-Design durch den AHT20 ersetzt werden kann.

8.4.4 Beschleunigung und Schockerkennung



Abbildung 28 - Gravity LIS2DH

(Quelle: Bastelgarage.ch o.D.)



Abbildung 29 - Fermion ADXL345

(Quelle: Bastelgarage.ch o.D.

Anforderungen aus dem Pflichtenheft
Der Sensor muss harte mechanische Schocks erkennen und als Ereignis mit Zeitstempel protokollieren (F02). Aus Kapitel 8.4.1 ergibt sich die zwingende Anforderung an einen Hardware-Interrupt mit konfigurierbarem Schwellenwert; eine periodische Abfrage ist für Einzelereignisse im Millisekundenbereich ungeeignet. Aus Kapitel 6.3 (Schadensmechanismen) ergibt sich ein benötigter Messbereich von mindestens ±8 g, wobei ±16 g eine sicherere Abdeckung möglicher Extremereignisse bietet.

Der Schwellenwert muss konfigurierbar sein, da die gemessene Beschleunigung stark von der Position des Sensors am Werkzeug abhängt.

Variantenvergleich
Für den Vergleich wurden zwei 3-Achsen-MEMS-Beschleunigungssensoren herangezogen: der DFRobot Gravity LIS2DH12 als Vertreter aus dem Gravity-Ökosystem und der ADXL345 von Analog Devices als weit verbreitete Alternative.

Merkmal	Variante A: Gravity LIS2DH12 (SEN0224)	Variante B: ADXL345 (GY-291 / DFRobot SEN0032)
Hersteller Sensorchip	STMicroelectronics (LIS2DH12)	Analog Devices (ADXL345)
Schnittstelle	I2C, Gravity 4-Pin + separater 6-Pin-Header für Interrupts	I2C und SPI, Pin-Header (kein Gravity-Stecker)
Messbereich	±2 g / ±4 g / ±8 g / ±16 g (konfigurierbar)	±2 g / ±4 g / ±8 g / ±16 g (konfigurierbar)
Auflösung	12 Bit	13 Bit
Hardware-Interrupt	2 programmierbare Interrupt-Ausgänge (INT1, INT2) auf dem 6-Pin-Header. Konfigurierbar für Schwellenwert, Bewegung, Free-Fall.	2 Interrupt-Ausgänge (INT1, INT2) auf Pin-Header. Konfigurierbar für Tap, Double-Tap, Activity, Free-Fall.
Hochpassfilter	Ja - interner Hochpassfilter für Bewegungserkennung	Nein - kein interner Hochpassfilter
Deep-Sleep Wakeup	Ja - INT-Signal kann ESP32 aus Deep-Sleep wecken	Ja - INT-Signal kann ESP32 aus Deep-Sleep wecken
Stromaufnahme	2 µA (Low-Power bei 1 Hz), 6-11 µA (Normal bei 50 Hz), 0.5 µA (Power-Down)	23 µA (Messung bei niedrigem ODR), 140 µA (bei ≥100 Hz), 0.1 µA (Standby)
Datenrate (ODR)	1 Hz bis 5.376 kHz (Low-Power). Standard: 1, 10, 25, 50, 100, 200, 400 Hz.	0.1 Hz bis 3200 Hz in 16 Stufen.
Einschaltzeit	1/ODR bis 7/ODR (modusabhängig)	ca. 11.1 ms bei 100 Hz ODR

Merkmal	Variante A: Gravity LIS2DH12 (SEN0224)	Variante B: ADXL345 (GY-291 / DFRobot SEN0032)
Steckverbindung	Gravity JST PH 2.0 für I2C; Interrupts über separaten 6-Pin-Header mit Stiftleiste	Nur Pin-Header (2.54 mm). Verdrahtung mit Jumperkabeln oder Lötverbindung erforderlich.
Verfügbarkeit Bastelgarage	Ja, als DFRobot Gravity SEN0224	Ja, als generisches GY-291-Modul (CHF 7.90). DFRobot-Version Fermion SEN0032 ebenfalls verfügbar (CHF 9.90), aber ohne Gravity-Stecker.
Preis (Bastelgarage)	CHF 10.90	CHF 7.90 (GY-291) / CHF 9.90 (Fermion SEN0032)

Beide Sensoren bieten denselben Messbereich von ±16 g und konfigurierbare Hardware-Interrupts. Die funktionale Grundanforderung F02 ist von beiden Varianten erfüllt. Auch bei der Datenrate sind beide für die Schockerkennung mehr als ausreichend: Der LIS2DH12 erreicht bis zu 5.376 kHz im Low-Power-Modus, der ADXL345 bis zu 3200 Hz. Die angegebenen möglichen Ausgaberaten sprechen grundsätzlich für die Eignung beider Sensoren zur Erfassung kurzer Ereignisse. Eine zuverlässige Detektion im konkreten Einbau hängt jedoch von aktiver Betriebsart, Filter, Auslöseschwelle, Achsenausrichtung, Montagesituation und realer Stossdauer ab und ist nicht allein aus der maximalen Datenrate ableitbar.

Der wesentliche Unterschied liegt in der physischen Anbindung: Der LIS2DH12 im Gravity-Format bringt den I2C-Anschluss als vorkonfektionierten Stecker mit, konsistent mit dem in diesem Kapitel festgelegten Ökosystem. Die Interrupt-Leitungen sind über einen separaten 6-Pin-Header zugänglich, was zwei zusätzliche Jumperkabel erfordert. Der ADXL345 (sowohl als generisches GY-291-Modul als auch in der DFRobot-Fermion-Variante SEN0032) bietet keinen Gravity-Stecker. Die gesamte Verdrahtung erfolgt über Pin-Header und Jumperkabel, was im Prototypenaufbau fehleranfällig und bei Vibrationen, die bei diesem Projekt gerade die Messgrösse sind, störungsanfällig ist.

Der interne Hochpassfilter des LIS2DH12 ist ein technischer Vorteil: Er ermöglicht die Unterscheidung zwischen statischer Beschleunigung (Gravitation, Neigung) und dynamischer Beschleunigung (Schock), ohne dass diese Filterung in der Firmware implementiert werden muss.

Variantenbewertung Beschleunigungs und Schockerkennung

Merkmal	Gewichtung	LIS2DH12 (SEN0224)	Begründung	ADXL345 (GY-291)	Begründung
Benutzerfreundlichkeit	26 %	5	Gravity-Stecker für I2C. Interrupt-Header klar beschriftet. Arduino-Library von DFRobot verfügbar. Plug-and-Play für die I2C-Verbindung.	2	Kein Gravity-Stecker. Alle Leitungen (VCC, GND, SDA, SCL, INT1, INT2) müssen einzeln über Jumperkabel verbunden werden. Höheres Risiko für Verdrahtungsfehler.
Kosten	18 %	4	CHF 10.90. Im Budget vertretbar.	5	CHF 7.90 (generisch). Geringste Kosten, aber keine Gravity-Integration.
Robustheit	16 %	5	Gravity-Stecker und vorkonfektionierte Kabel sind vibrationsfester als Jumperkabel auf Pin-Headern. Bei einem Sensor, der Vibrationen misst, ist die	3	Jumperkabel auf Pin-Headern sind bei Vibrationen und Transport störungsanfällig. Kontaktprobleme können zu

Merkmal	Gewichtung	LIS2DH12 (SEN0224)	Begründung	ADXL345 (GY-291)	Begründung
			mechanische Stabilität der Verbindung besonders relevant.		Fehlmessungen oder Signalverlust führen.
Erweiterbarkeit	14 %	5	Interner Hochpassfilter für Bewegungserkennung. Beide Interrupts unabhängig konfigurierbar. Deep-Sleep-Wakeup möglich.	4	Tap/Double-Tap-Erkennung als Zusatzfunktion. Interrupts konfigurierbar. Kein interner Hochpassfilter.
Anzahl Einzelteile	12 %	4	1 Sensormodul + 1 Gravity-Kabel + 2 Jumperkabel (für Interrupt-Leitungen am 6-Pin-Header).	3	1 Sensormodul + 6 Jumperkabel (VCC, GND, SDA, SCL, INT1, INT2). Kein vorkonfektioniertes Kabel nutzbar.
Komponentenverfügbarkeit	11 %	5	DFRobot Gravity - Teil des gewählten Ökosystems. Bei der Bastelgarage und DFRobot direkt verfügbar.	4	Als generisches GY-291-Modul bei der Bastelgarage verfügbar. Kein Markenhersteller - Nachlieferung des identischen Moduls nicht garantiert.
Genauigkeit	3 %	4	12-Bit-Auflösung. Für die Schwellenwertüberschreitung (Schock ja/nein) ausreichend.	5	13-Bit-Auflösung. Marginal besser, für Schwellenwert-Erkennung ohne praktischen Unterschied.
Gewichtete Summe	**100 %**	**4.67**		**3.41**	

Berechnung Variante A (LIS2DH12): 5×0.26 + 4×0.18 + 5×0.16 + 5×0.14 + 4×0.12 + 5×0.11 + 4×0.03 = 1.30 + 0.72 + 0.80 + 0.70 + 0.48 + 0.55 + 0.12 = **4.67**

Berechnung Variante B (ADXL345): 2×0.26 + 5×0.18 + 3×0.16 + 4×0.14 + 3×0.12 + 4×0.11 + 5×0.03 = 0.52 + 0.90 + 0.48 + 0.56 + 0.36 + 0.44 + 0.15 = **3.41**

Das Ergebnis ist mit einem Abstand von 1.26 Punkten eindeutig. Der LIS2DH12 erreicht den höheren Gesamtnutzwert insbesondere durch die bessere Bewertung bei Benutzerfreundlichkeit (5 gegenüber 2), Robustheit (5 gegenüber 3), Erweiterbarkeit (5 gegenüber 4) und Komponentenverfügbarkeit (5 gegenüber 4). Beim Kostenkriterium liegt dagegen der ADXL345 mit 5 gegenüber 4 Punkten vorne; dieser Vorteil kompensiert die übrigen Unterschiede in der gewählten Gewichtung nicht. Der fehlende Gravity-Stecker des ADXL345 wirkt sich über mehrere Kriterien kumulativ aus und kann durch den geringfügigen Preisvorteil von 3 CHF nicht kompensiert werden.

Validierung am Breadboard
Die Funktionsfähigkeit des Sensors und die Interrupt-gesteuerte Schockerkennung wurden im Breadboard-Aufbau während des Komponententests (MS4) überprüft.

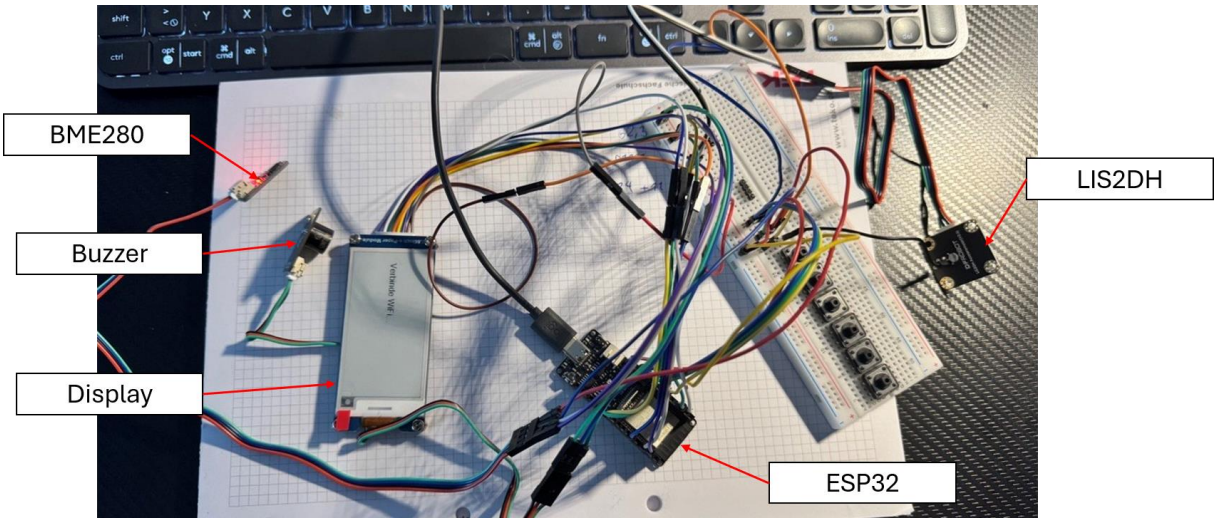


Abbildung 30 - Komponententest am Breadboard

Versuchsreihe Schwellenwertermittlung:
Die Versuche wurden durchgeführt, um einen sinnvollen Standardwert für den konfigurierbaren Schwellenwert zu ermitteln (gemäss Risiko-Massnahme R6).

Versuch	Aktion	Gemessene Beschleunigung [g]	Ereignis ausgelöst (bei Schwellenwert 2 g)?
1	Normales Absetzen auf Tisch	1.61 g	Nein
2	Simulation - Hartes Absetzen auf Palette (Papierblockunterlage gegen Tisch bewegt)	1.88 g	Nein
3	Stoss seitlich, mit Finger	2.41 g	Ja
4	Normaler Transport mit Hubwagen (Papierblockunterlage mit Händen geschmeidig bewegt)	1.14 g	Nein
5	Falltest aus 5 cm Höhe	4.62 g	Ja

Erkenntnis:
In dieser explorativen Versuchsreihe lösten bei einer Vergleichsschwelle von 2.0 g die Versuche 3 und 5 ein Ereignis aus, die Versuche 1, 2 und 4 nicht. Das als «hartes Absetzen» bezeichnete Szenario 2 wurde trotz eines Messwerts von 1.88 g nicht erkannt. Daraus ergibt sich kein Nachweis einer allgemeingültigen Trennschwelle zwischen normalem Handling und schadensrelevantem Stoss. Als Standardwert in der Firmware wurde deshalb 1.5 g gewählt, damit auch ein hartes Absetzen protokolliert wird; der Schwellenwert ist als konfigurierbarer, am Prototyp versuchsweise gewählter Parameter zu verstehen (einstellbar 0.5 bis 2.0 g, Kapitel 9.2). Eine einsatzabhängige Festlegung erfordert Messungen am montierten Modul und am tatsächlichen Werkzeug. Werden im Betrieb zu viele Ereignisse bei normalem Handling registriert, lässt sich die Schwelle nachträglich über die Konfiguration anpassen.

Entscheidung
Der DFRobot Gravity LIS2DH12 (SEN0224) wird als Beschleunigungssensor gewählt. Er erreicht in der gewichteten Bewertung 4.67 von 5 Punkten und übertrifft den ADXL345 (3.41 Punkte) deutlich.

Die Entscheidung ist primär durch die Integration in das Gravity-Ökosystem begründet: Der LIS2DH12 bringt den I2C-Anschluss als vorkonfektionierten Gravity-Stecker mit und reduziert damit die Verdrahtung auf ein Minimum. Bei einem Sensor, dessen Aufgabe die Erkennung von Vibrationen und Schocks ist, ist die mechanische Stabilität der elektrischen Verbindung kein Komfortmerkmal, sondern eine funktionale Anforderung. Lockere Jumperkabel auf Pin-Headern würden bei Erschütterungen genau die Fehlsignale erzeugen, die der Sensor erkennen soll.

Zusätzlich bietet der interne Hochpassfilter des LIS2DH12 eine Differenzierung zwischen statischer und dynamischer Beschleunigung auf Hardware-Ebene. Diese Eigenschaft vereinfacht die Firmware-Entwicklung, da die Filterung nicht in Software nachgebaut werden muss.

Der Preisunterschied von CHF 3.00 (LIS2DH12: CHF 10.90, ADXL345: CHF 7.90) und die marginal höhere Auflösung des ADXL345 (13 Bit vs. 12 Bit) sind bei einer Schwellenwertanwendung (Schock ja/nein) nicht entscheidungsrelevant.
Die hier erfassten Beschleunigungen sind lokale Messwerte am Sensormodul. Sie lassen sich ohne Kalibrierung an der Werkzeugbefestigung nicht direkt mit Transportschock-Indikatoren anderer Bauarten oder mit einer Schadensschwelle eines mehrere hundert Kilogramm schweren Werkzeugs gleichsetzen. Die protokollierten Ereignisse dienen vorerst als Anhaltspunkte für aussergewöhnliche Belastungen, nicht als Nachweis eines eingetretenen mechanischen Schadens.

8.4.5 Werkzeugbewegung und digitale Eingänge

Das Sensor-Modul muss über konfigurierbare digitale Eingänge Werkzeugbewegungen (Schliesszyklus) erkennen und daraus Produktionsblöcke (Start/Stopp) sowie Zykluszeiten mit Zeitstempel ableiten (F04). Aus Kapitel 8.4.1 ergibt sich eine interruptgesteuerte Erfassung über Flankenerkennung.

Gleichzeitig gilt die Abgrenzung aus Kapitel 3.4 und die Festanforderung F10: Das System darf nicht in die Maschinensteuerung eingreifen und soll keine Änderung an der vorhandenen Steuerungsverkabelung erfordern.

Variantenvergleich

Für die Erfassung der Werkzeugbewegung existieren drei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze. Sie unterscheiden sich nicht in der Messgrösse (digitales Signal: Werkzeug offen/geschlossen), sondern im Signalursprung und in der Integration.

Variante A: Vorhandene Werkzeug-Endschalter mitnutzen



Abbildung 31 - Induktiver Sensor - E 6560 (Quelle: Meusburger, o.D.)

Spritzgusswerkzeuge sind in der Regel mit Endschaltern ausgestattet, die den Schliesszustand an die Maschinensteuerung melden. Diese Signale könnten abgegriffen werden, ohne einen zusätzlichen Sensor zu montieren. Der Vorteil wäre ein minimaler Hardware-Aufwand. Das Mitnutzen bereits vorhandener Schaltsignale kann eine zusätzliche Verbindung zur Maschinen- oder Werkzeugsteuerung erfordern. Ob ein konkretes Signal Teil einer Sicherheitsfunktion ist, hängt von der Anlage und ihrer Verdrahtung ab. Für das Projekt wird der Ansatz ausgeschlossen, weil die vorhandene Steuerungsverkabelung nicht verändert werden soll (Abgrenzung Kapitel 3.4, Festanforderung F10). Variante A wird daher nicht bewertet.

Variante B: Industrieller Endschalter am Werkzeug



Abbildung 32 - Endschalter E6512 (Quelle Meusburger o.D.)

Ein zusätzlicher mechanischer Endschalter (z.B. von Meusburger, einer der Standardlieferanten für Normalien im Werkzeugbau) wird am Werkzeug montiert und direkt mit dem Sensor-Modul verbunden. Meusburger-Endschalter sind industrieerprobt und für die rauen Bedingungen in der Produktion ausgelegt. Allerdings ergeben sich für dieses Projekt mehrere Herausforderungen:

1. Ein zusätzlich montierter industrieller Schalter kann je nach Bauart als potenzialfreier Kontakt oder mit eigener elektronischer Versorgung (typisch 24 V) ausgeführt sein. Die Notwendigkeit einer Pegelwandlung auf 3.3 V ist am ausgewählten Typ und seinem Datenblatt zu prüfen.
2. Die Mindestlast (Wetting Current) mechanischer Kontakte ist auf industrielle Steuerungen ausgelegt; bei den niedrigen Strömen eines ESP32-GPIO ist nicht garantiert, dass die Kontakte zuverlässig schalten. Auch dies ist am gewählten Typ zu prüfen.
3. Meusburger-Komponenten sind primär über den industriellen Vertrieb erhältlich; die Beschaffung als Privatperson (Randbedingung W09) ist eingeschränkt.

Variante C: Eigener Sensor mit 3.3-V-Logik



Abbildung 33 - Gravity mechanischer Endschalter (Quelle: Bastelgarage o.D.)

Ein einfacher Mikroschalter, Reed-Kontakt oder Näherungssensor mit 3.3-V-Logikpegel wird über einen Gravity-kompatiblen Steckplatz (JST PH 2.0) am Sensor-Modul angeschlossen. Das Signal ist direkt mit dem ESP32-GPIO kompatibel, ohne Pegelwandlung. Die Komponenten sind als Gravity-Module oder als Einzelbauteile bei der Bastelgarage beschaffbar.

Merkmal	**Variante B: Industrie-Endschalter**	**Variante C: 3.3-V-Sensor (Gravity-kompatibel)**
Signalpegel	24 V (Pegelwandlung erforderlich)	3.3 V (direkt kompatibel mit ESP32)
Steckverbindung	M8- oder M12-Industriestecker → Adapter auf JST erforderlich	JST PH 2.0 (Gravity) oder direkte Verdrahtung
Industrietauglichkeit	Hoch, für Produktionsumgebung ausgelegt	Eingeschränkt, nicht für industrielle Dauerbelastung ausgelegt
Beschaffbarkeit als Privatperson	Eingeschränkt (Meusburger: Firmenkonto bevorzugt)	Gegeben (Bastelgarage, ohne Firmenkonto)
Zusatzkomponenten	Pegelwandler, Adapterplatine, industrielle Stecker/Kabel	Keine, direkte Anbindung möglich

Konzeptbewertung

Werkzeugbewegung

Variante A ist durch F10 ausgeschlossen und wird nicht bewertet. Die Bewertung vergleicht die verbleibenden Varianten B und C.

Merkmal	Gewichtung	Variante B (Industrie)	Begründung	Variante C (3.3 V)	Begründung
Benutzerfreundlichkeit	26 %	3	M8/M12-Stecker und Pegelwandler erfordern Adaptierung. Wetting-Current-Problematik muss in der Inbetriebnahme beachtet werden.	5	JST-Stecker, 3.3-V-Logik. Plug-and-Play am Sensor-Modul. Keine Pegelwandlung, kein Adapter.
Kosten	18 %	2	Industrieller Endschalter + Pegelwandler + Adapterplatine + M8-Kabel. Industriekomponenten sind deutlich teurer als Maker-Bauteile.	5	Mikroschalter oder Reed-Kontakt für wenige Franken. Gravity-Kabel vorhanden.
Robustheit	16 %	5	Industriegehärtet. Für Millionen Schaltzyklen ausgelegt. Hohe Schutzart (IP67 typisch).	3	Nicht für industrielle Dauerbelastung ausgelegt. Für den Prototyp und die Validierungsphase ausreichend, nicht für den Produktionseinsatz über Jahre.
Erweiterbarkeit	14 %	4	Standardisierter Industrieanschluss. In einer Serienversion direkt integrierbar.	4	Steckplätze am Sensor-Modul sind konfigurierbar. Anzahl und Typ der Sensoren können angepasst werden.
Anzahl Einzelteile	12 %	2	Endschalter + Pegelwandler + Adapterplatine + M8-Kabel + JST-Kabel. Mindestens 5 Einzelteile pro Kanal.	5	Sensor + Gravity-Kabel. 2 Einzelteile pro Kanal.
Komponenten-verfügbarkeit	11 %	3	Meusburger: Firmenkonto bevorzugt. Lieferzeit und Bestellprozess für Privatpersonen nicht optimal (W09).	5	Bastelgarage: Bestellung als Privatperson, Lieferung in wenigen Werktagen.
Genauigkeit	3 %	5	Digitales Signal (offen/geschlossen). Keine Messabweichung relevant.	5	Digitales Signal (offen/geschlossen). Keine Messabweichung relevant.
Gewichtete Summe	**100 %**	**3.22**		**4.54**	

Berechnung Variante B (Industrie): 3×0.26 + 2×0.18 + 5×0.16 + 4×0.14 + 2×0.12 + 3×0.11 + 5×0.03 = 0.78 + 0.36 + 0.80 + 0.56 + 0.24 + 0.33 + 0.15 = **3.22**

Berechnung Variante C (3.3 V): 5×0.26 + 5×0.18 + 3×0.16 + 4×0.14 + 5×0.12 + 5×0.11 + 5×0.03 = 1.30 + 0.90 + 0.48 + 0.56 + 0.60 + 0.55 + 0.15 = **4.54**

Die 3.3-V-Variante erreicht 4.54 von 5 Punkten und liegt damit um 1.32 Punkte vor der industriellen Variante mit 3.22 Punkten. Der industrielle Endschalter schneidet zwar bei der Robustheit besser ab, das einzige Merkmal, in dem er die Alternative übertrifft, verliert aber in vier von sieben Kriterien deutlich: Benutzerfreundlichkeit, Kosten, Anzahl Einzelteile und Komponentenverfügbarkeit.

Einordnung der Robustheit
Die niedrigere Robustheitsbewertung der 3.3-V-Lösung (3 vs. 5) verdient eine Einordnung. Das Ziel dieser Arbeit ist ein funktionsfähiger Prototyp, der die Machbarkeit des Konzepts belegt, ein Einstieg in die Datenerfassung bei Spritzgusswerkzeugen erlaubt und keine serienreife Produktionslösung. Für die Validierungsphase und den Einsatz über Wochen bis Monate ist die Robustheit eines Mikroschalters oder Reed-Kontakts ausreichend. Sollte das System in einer Serienversion eingesetzt werden, kann der Sensortyp am konfigurierbaren Steckplatz ohne Änderung der Firmware gegen eine industriegehärtete Variante getauscht werden, vorausgesetzt, der Signalpegel bleibt bei 3.3 V oder eine Pegelwandlung wird auf der Adapterplatine integriert.

Validierung am Breadboard
Da es sich um simple digitale Werte handelt, die entweder LOW oder HIGH sind wurden die Werkzeugbewegungsschalter nicht am Breadboard überprüft.

Entscheidung
Für die Erkennung der Werkzeugbewegung werden konfigurierbare digitale Eingänge mit 3.3-V-Logikpegel realisiert (Variante C). Die Steckplätze am Sensor-Modul verwenden JST-PH-2.0-Stecker, konsistent mit dem Gravity-Ökosystem. Als Sensoren kommen je nach Einbausituation Mikroschalter, Reed-Kontakte oder Näherungssensoren mit 3.3-V-Ausgang infrage.

Die Variante des industriellen Endschalters (Variante B) erreicht zwar die höchste Robustheitsbewertung, scheitert aber an der Gesamtbewertung: Der Zusatzaufwand für Pegelwandlung, Adaptierung und Beschaffung steht in keinem Verhältnis zum Prototyp-Charakter dieser Arbeit. Die konkrete Anzahl der Steckplätze und die Pin-Zuordnung werden in Kapitel 8.5 (Pinbelegung) festgelegt.

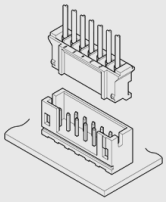
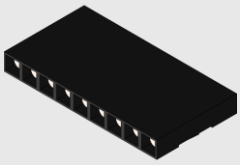
8.5 Schnittstellen und Verkabelung

In Kapitel 8.4 wurde8.4 festgelegt, welche Sensoren eingesetzt werden. Dieses Kapitel bestimmt, wie sie physisch mit dem Sensor-Modul verbunden werden. Die Stecker- und Kabelwahl ist die Stelle im Entwurf, an der die Erkenntnis aus dem Kapitel 6.6 am stärksten wirkt: Der Anwender ist ein erfahrener Werkzeugmacher, kein Elektroniker. Jeder Anschlussvorgang muss so gestaltet sein, dass ein falsches Einstecken entweder physisch unmöglich oder elektrisch schadlos ist. Die Anforderungen: Verpolungssichere Steckverbindungen, Standardstecker und wo verfügbar vorkonfektionierte Kabel bilden den Rahmen.

8.5.1 Steckersystem

Drei Steckersysteme kommen für Niederspannungssignale infrage:

Tabelle 6 - Steckersystemtypen und Eigenschaften

	 *Abbildung 34 - JST Stecker CAD Screenshot (J.S.T. Mfg. Co., Ltd., o.D.)*	 *Abbildung 35 - Dupont Cable Connector (Tyrkin, 2019)*	 *Abbildung 36 - M8 Rundstecker CAD Screenshot (TE Connectivity, o.D.)*
Merkmal	**JST PH 2.0 mm**	**Dupont 2.54 mm**	**M8-Rundstecker**
Kodierung	Ja, asymmetrisches Gehäuse	Nein, symmetrischer Pin-Header	Ja, Codiernase
Vorkonfektionierte Kabel	Ja (Gravity-Zubehör)	Nein (lose Jumper)	Ja (Industrieleitungen)
Signalpegel	3.3 V	3.3 V	Typisch 24 V
Preis Kabel (3-pol.)	ca. CHF 2.-	ca. CHF 0.50	ca. CHF 8.- bis 15.-
Rastmechanismus	Ja	Nein	Ja (Schraubverriegelung)

Dupont scheidet aus. Der Stecker ist nicht kodiert. Der Anwender kann ihn um 180° gedreht einstecken und vertauscht damit VCC und GND. Für einen Werkzeugmacher ohne Elektronikkenntnisse ist das kein Randfall, sondern eine Gewissheit. Hinzu kommt: Jumper-Einzeladern besitzen keinen Rastmechanismus. Bei einem Gerät, das am Werkzeug montiert ist und Vibrationen erkennen soll, sind lockere Kontakte ein systematischer Fehler.

M8 scheidet aus. Der Rundstecker ist bei Meusburger, Hasco, ifm und vergleichbaren Herstellern der Standard für Werkzeugsensorik. Genau darin liegt das Problem. Er suggeriert dem Anwender, dass jeder Sensor mit M8-Anschluss kompatibel ist. Das Sensor-Modul arbeitet jedoch bewusst auf 3.3-V-Logikpegel (Randbedingung Kapitel 8.1). Ein industrieller 24-V-Näherungsschalter mit M8-Stecker zerstört den GPIO-Eingang des ESP32. M8 erzeugt eine falsche Erwartung an die Signalkompatibilität. Der Fehler liegt nicht auf Steckerebene, sondern auf Systemebene.

JST PH 2.0 bleibt als einzige Variante übrig, die alle Anforderungen erfüllt: Verpolungssicher durch Gehäuseform, dokumentierter Standard, vorkonfektionierte Gravity-Kabel erhältlich, kompatibel mit dem in Kapitel 8.4 gewählten Ökosystem.

Entscheidung

Damit dem Nutzer aber die Möglichkeit bleibt das System mit den mitgelieferten Gravity-Dupont-Kabeln aufzubauen werden am PCB beide Systeme vorgefertigt. So kann ein Nutzer das System ohne das beschaffen zusätzlicher Kabel bauen, mit dem bewussten Verzicht auf Verpolungssicherheit sowie der Gewissheit, dass sich die Dupont mit viel Bewegung lösen können.

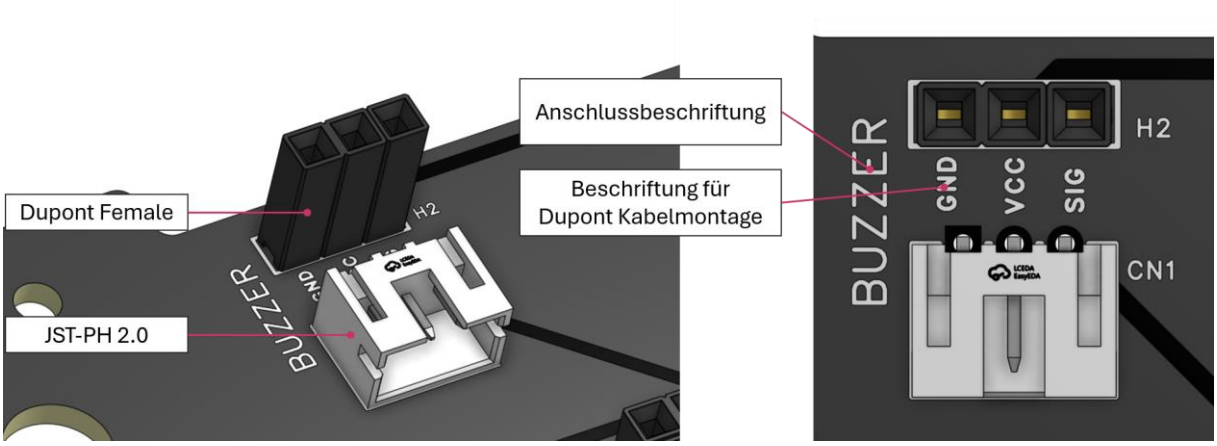


Abbildung 37 - CAD Screenshot der PCB Baugruppe mit Vermerken (Quelle: Selbstgemachtes Bild)

Damit auch ein funktionsfähiger Anschluss mit den Dupont Kabeln realisiert werden kann sind die einzelnen Pins am PCB beschriftet. Wäre nur der JST auf dem PCB enthalten könnte die Beschriftung der einzelnen Pins weggelassen werden.

In der Praxis kann durch diesen Aufbau beim Nachbau des Systems die gewünschte Konfiguration aus Dupont oder JST frei gewählt werden. Wird beispielsweise JST gewählt können die anderen schnittstellen auf dem PCB unbestückt bleiben.

8.5.2 Kabelbelegung: Same Side und Reverse Side

Der JST-PH-Stecker verhindert, dass ein Kabel falsch herum eingesteckt wird (Verdrehschutz, siehe Kapitel 8.5.3). Er verhindert nicht, dass das falsche Kabel eingesteckt wird.

JST-PH-Kabel existieren in zwei Ausführungen, die auf den ersten Blick gleich aussehen:

- Same Side: Beide Steckergehäuse zeigen mit derselben Seite nach oben. Pin 1 führt auf den letzten Pin der Gegenseite. Bei 3-polig: 1→3, 2→2, 3→1.
- Reverse Side: Ein Steckergehäuse ist um 180° gedreht. Pin 1 führt auf Pin 1 der Gegenseite. Belegung 1:1.

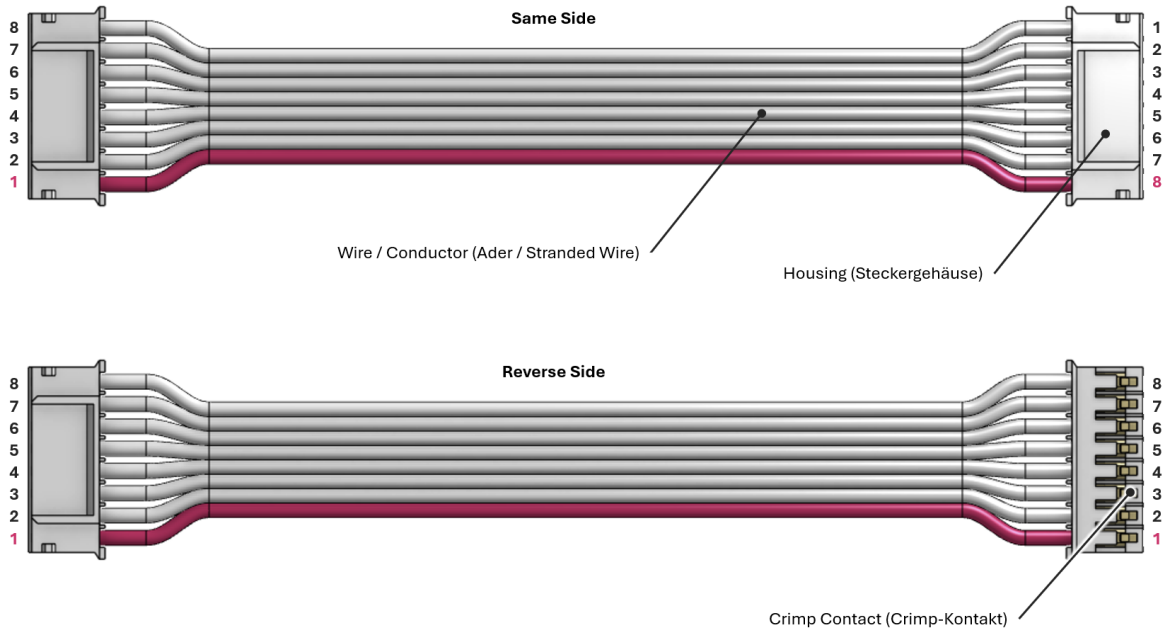


Abbildung 38 - CAD-Screenshot JST Kabel (Quelle: Selbstgemachtes Bild)

Der Unterschied entsteht bei der Konfektionierung: Werden die Crimpkontakte an beiden Enden in derselben Orientierung ins Gehäuse eingeführt, ergibt sich Same Side. Für Reverse Side wird ein Ende um 180° gedreht bestückt. Beide Varianten werden im selben Shop nebeneinander angeboten. Ohne Vorwissen fällt der Unterschied nicht auf. Sicher feststellen lässt er sich nur durch Sensibilisierung.

Wählt ein Werkzeugmacher beim Nachbestellen den falschen Kabeltyp, werden diverse Pins vertauscht, trotz verpolungssicherem Stecker. Die Kodierung des Gehäuses schützt also nur gegen eine Fehlerklasse (180° Drehung), nicht gegen die andere (falscher Kabeltyp).

Dieses Risiko ist nicht theoretisch. Eine gespiegelte Pinbelegung trat im Projekt selbst auf, dort verursacht durch einen fehlerhaften Footprint (siehe Kapitel 14, Lessons Learnt). Der Fehler blieb einen Abend lang unentdeckt, weil Durchgangs- und Spannungsmessungen unauffällig waren. Ein Anwender ohne Systemtechnik Kenntnisse wird ihn nicht finden.

Massnahme

Für das Sensor-Modul werden ausschliesslich Same-Side-Kabel als Standard definiert. Die Pinbelegung ist dabei gespiegelt (bei 3-poligen Kabeln: 1→3, 2→2, 3→1).

8.5.3 Verriegelung

Die Tabelle in Kapitel 8.5.1 führt für JST PH einen Rastmechanismus auf. JST selbst nennt die Verriegelungsart der PH-Serie «Friction lock» (J.S.T. Mfg. Co., Ltd., o.D.). Der Begriff ist missverständlich: Er bezeichnet keine reine Reibverbindung, sondern eine Rastung ohne Entriegelungshebel. Eine angeformte Nase am einen Teil greift in eine Aussparung am anderen und muss beim Abziehen überdrückt werden.

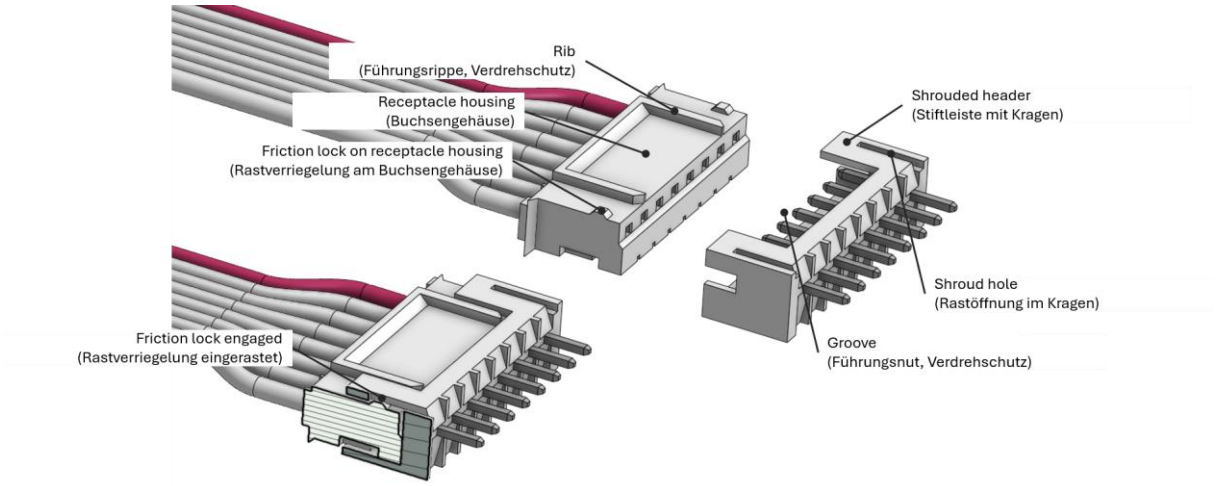


Abbildung 39 - CAD-Screenshot JST Verbindung (Quelle: Selbstgemachtes Bild)

Die Abbildung zeigt diese Rastung an den CAD-Daten. Das Buchsengehäuse trägt zwei Nasen, die beim Einstecken in die Öffnungen im Kragen der Stiftleiste einrasten. Der Kragen umschliesst das Gehäuse auf allen vier Seiten. Die Führungsrippe am Gehäuse läuft in der Nut des Kragens und bildet den Verdrehschutz aus Kapitel 8.5.1. Die Rastung wurde am realen Stecker überprüft.

Die Rastung hat Grenzen. Sie bietet mehr Widerstand gegen Vibration als eine reine Reibverbindung wie beim Dupont-Jumper, löst sich aber leichter als eine Verriegelung mit Hebel. JST selbst bezeichnet sie als schwache Verriegelung. Für das Sensor-Modul ist das ausreichend: Die Steckverbindungen liegen im Inneren des Gehäuses, Zug am Kabel tritt im Betrieb nicht auf. Die Rastung muss nur verhindern, dass sich der Stecker durch Vibration von selbst löst.

8.5.4 Farbkonzept der Kabel

Aus dem Pflichtenheft folgt, dass der Anwender für den Anschluss der externen Peripherie weder crimpen noch löten muss. Er steckt ein fertiges, JST-PH kompatibles Kabel ein.

Für Sonderlängen wird ein Querschnitt von 3×0.14 bis 3×0.20 mm² vorgesehen (Crimpbereich JST PH: AWG 28-24). Die Kabelfarbe wird auf Orange empfohlen: Maschinenkabel sind überwiegend schwarz, weiss oder grau, eine orangefarbene Leitung ist beim Rüsten auf einen Blick als Condition-Monitoring-Kabel erkennbar.

8.6 Kommunikationskonzept

Das Sensor-Modul hat genau einen Kommunikationsweg: WLAN mit HTTP. Das Gerät ist der Webserver, der Browser des Anwenders ist der Client. Darüber laufen Inbetriebnahme, Konfiguration, Anzeige und Datenausgabe. Es gibt keine App, kein Datenkabel und kein Konfigurationsfile. Der Anwender braucht nur ein Gerät, das er bereits besitzt und bedienen kann: ein Smartphone oder einen Laptop (F07, Kapitel 6.6).

Zwei Netzwerkmodi
Ob ein Gerät ins Firmen-WLAN darf, entscheidet nicht der Werkzeugmacher, sondern die IT (Kapitel 8.2). Das Sensor-Modul kennt deshalb zwei Betriebsarten, zwischen denen der Anwender bei der Inbetriebnahme wählt. Im Standalone-Modus spannt es ein eigenes WLAN auf und ist damit ohne jede Infrastruktur nutzbar (F09).

Tabelle 7 - Netzwerkmodi des Sensor-Moduls

	Einrichtung	**WLAN-Modus**	**Standalone-Modus**
Rolle	Eigener Zugangspunkt	Teilnehmer im Firmen-WLAN	Eigener Zugangspunkt
Netzwerkname	MCM[1]- und vier Zufallsziffern	Name des Firmen-WLAN	MCM- und Equipment-Nummer
Passwort	Zufällig, bei jedem Start neu	Passwort des Firmen-WLAN	Fest hinterlegt
Adresse	192.168.4.1	Vom Netzwerk zugewiesen	192.168.4.1
Uhrzeit	Noch keine	Zeitserver (NTP)	Uhr des Browsers bei der Einrichtung

Zugang ohne IP-Adresse
Der Anwender tippt nie eine Adresse ein. Bei der Einrichtung zeigt das Display einen QR-Code mit den Zugangsdaten des Geräte-WLAN. Nach dem Scannen verbindet sich das Smartphone, und das Captive Portal öffnet die Konfigurationsseite von selbst (W04). Dafür beantwortet das Gerät jede Namensanfrage mit der eigenen Adresse. Im Betrieb zeigt das Display einen zweiten QR-Code. Er führt direkt auf die Übersichtsseite, das Cockpit. Den Ablauf aus Sicht des Anwenders beschreibt Kapitel 9.2.

Datenausgabe
Die Daten werden abgeholt, nicht gesendet. Drei Adressen liefern JSON: der aktuelle Zustand, die Ereignisse eines Zeitfensters und der gesamte Speicherinhalt als Export. Ein Backend im selben Netzwerk fragt diese Adressen in seinem eigenen Takt ab. Damit ist die Anbindung für Dritte möglich (F06), ohne dass das Gerät ein Ziel kennen muss. Das Cockpit nutzt dieselben Adressen. Die Spezifikation steht in Kapitel 11.7.

Abgrenzung
Nicht umgesetzt ist das selbstständige Senden an ein Backend (W03). Ein Publish-Protokoll wie MQTT setzt einen Broker voraus, also genau die Infrastruktur, die das Edge-Device nicht verlangen soll. Der Export erfolgt als JSON und nicht als CSV (W01).

Einschränkungen
Wer nach der Einrichtung Einstellungen ändern will, braucht eine sechsstellige PIN, die nur auf dem Display des Geräts erscheint. Er muss also am Werkzeug stehen. Zudem ist das WLAN nur aktiv, solange das Gerät wach ist. Im Akkubetrieb ist das Cockpit deshalb nicht dauernd erreichbar (Kapitel 8.8).

[1] MCM steht für Mould Condition Monitoring

8.7 Speicherarchitektur und Ereignismodell

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 4).

Der interne Flash des ESP32 ist der einzige Datenspeicher des Sensor-Moduls. Dieses Kapitel legt fest, was gespeichert wird und in welcher Form, und es weist nach, wie lange der Speicher reicht (F05).

8.7.1 Ereignismodell

Gespeichert wird nicht jeder Zyklus, sondern jedes Ereignis. Der Grund ist eine einfache Rechnung mit dem Werkzeug aus Kapitel 6.2: Bei 10.5 s Zykluszeit fallen 8'229 Zyklen pro Tag an. Ein Eintrag pro Zyklus würde den Speicher in weniger als zehn Tagen füllen. Der Zykluszähler läuft deshalb als einzelne Zahl mit, und Einträge halten den Zählerstand fest. Ein Produktionsblock braucht so nur zwei Einträge: Beginn und Ende. Aus der Differenz der Zählerstände und der Zeitstempel ergeben sich Stückzahl und mittlere Zykluszeit des Blocks (F04).

Der gespeicherte Datensatz erlaubt die Berechnung der mittleren Zykluszeit je abgegrenztem Produktionsblock. Individuelle Start-/Endzeitpunkte und Zykluszeiten sämtlicher Einzelzyklen werden nicht als separate Datensätze archiviert. Bei einer Detailauswertung ist deshalb zwischen dem laufenden Zähler, der aktuell angezeigten Zykluszeit und den rückwirkend rekonstruierbaren Blockmittelwerten zu unterscheiden.

Tabelle 8 - Ereignistypen

Typ	Ereignis	Auslöser	Inhalt
1	Zustandswechsel	Wechsel zwischen Produktion, Unterbruch, Transport, Lager und Werkzeug offen	Neuer Zustand, Zählerstand
2	Schock	Schlag über dem Schwellenwert (F02)	Spitzenwert in g, Zustand, Zählerstand
3	Klima	Periodisch, im Wachbetrieb alle 10 Minuten	Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Taupunkt, Kennzeichen Kondensationsrisiko (F03), Akkuspannung
4	Konfiguration	Änderung über die Weboberfläche, Werksreset	Art der Änderung, Zählerstand vorher und nachher
5	Stromversorgung	USB an oder ab, Akku tief oder kritisch, Produktion ohne Netzstrom	Art, Akkuspannung, Zustand

Das Kondensationsrisiko ist kein eigener Eintrag, sondern ein Kennzeichen im Klima-Eintrag. So entsteht pro Messung genau ein Datensatz, und der Verlauf vor und nach der Schwelle bleibt sichtbar. Typ 4 macht nachvollziehbar, wenn jemand den Zählerstand von Hand ändert. Wie die Firmware die Ereignisse erkennt, beschreibt Kapitel 11.3.

8.7.2 Datensatz und Ringpuffer

Jeder Eintrag ist genau 24 Byte gross, unabhängig vom Typ.

Tabelle 9 - Aufbau eines Eintrags

Byte 0 bis 3	Byte 4	Byte 5 bis 23
Zeitstempel in Sekunden (Unix-Zeit)	Ereignistyp 1 bis 5	Nutzdaten je nach Typ, als Ganzzahlen. Die Temperatur zum Beispiel in Hundertstel Grad.

Die feste Länge ist der Kern des Speichermanagements: Die Position eines Eintrags in der Datei ist seine Platznummer mal 24. Es braucht kein Inhaltsverzeichnis und keine Suche. Alle Einträge liegen in einer einzigen Datei, die als Ringpuffer mit 80'000 Plätzen geführt wird. Eine Laufnummer zählt mit jedem Eintrag hoch, der Platz ergibt sich aus der Laufnummer modulo 80'000. Ist der Puffer voll, überschreibt der neueste Eintrag den ältesten. Das Konzept kommt ohne Löschen und ohne Eingriff des Anwenders aus.

8.7.3 Speicherebenen

Flash behält seinen Inhalt ohne Strom, verträgt aber nur eine begrenzte Zahl von Schreibvorgängen. Deshalb wird nicht alles sofort geschrieben. Ereignisse gehen sofort in den Flash, denn sie sind der Zweck des Geräts. Zählerstand und Schreibposition ändern sich laufend und werden nur alle 10 Minuten sowie vor jedem Schlaf gesichert. Den Deep Sleep (Kapitel 11.5) überbrückt der RTC-Speicher des ESP32.

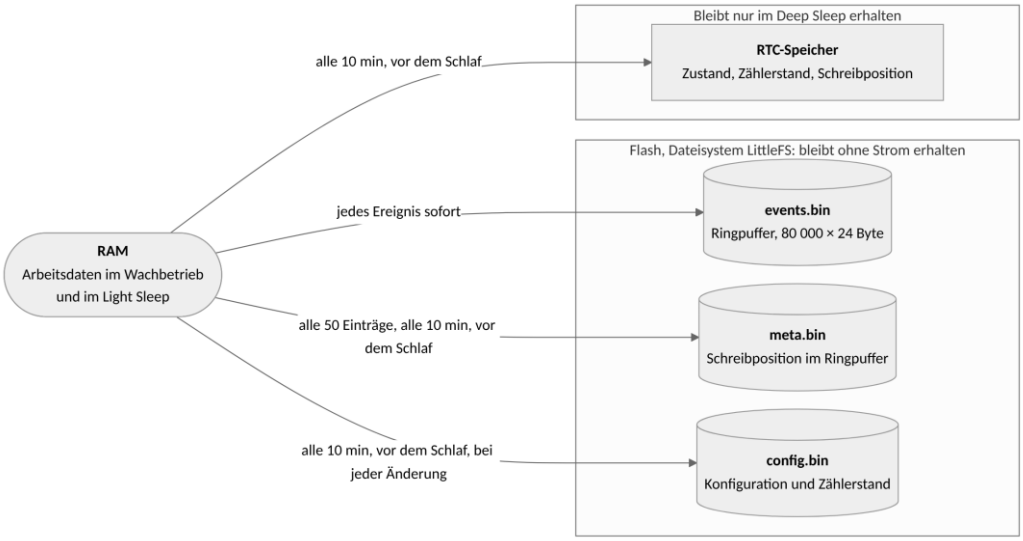


Abbildung 40 - Speicherebenen des Sensor-Moduls (Quelle: Selbst erstellt)

Einordnung

Die seltene Sicherung hat einen Preis. Fällt die Versorgung ohne Vorwarnung ganz aus, fehlen bis zu 10 Minuten Zyklen, und bis zu 49 der letzten Einträge können überschrieben werden. Das ist die Folge der Einschränkung aus Kapitel 8.3.3. Im Normalfall tritt sie nicht ein: Vor jedem Schlaf sichert das Gerät alles, und bei kritischem Akku geht es ausserhalb der Produktion sofort in den Schlaf.

8.7.4 Speicherkapazität

Der FireBeetle hat 4 MB Flash (Kapitel 8.3). Mit dem Partitionsschema «No OTA (2MB APP/2MB SPIFFS)» stehen davon 2 MB für das Dateisystem zur Verfügung. Der Ringpuffer belegt maximal 80'000 × 24 Byte = 1'920'000 Byte, also 1.83 MB. Der Rest bleibt für die Konfiguration und die Verwaltung des Dateisystems.

Die Reichweite hängt nur von der Zahl der Einträge pro Tag ab: Reichweite in Tagen = 80'000 / Einträge pro Tag. Die Zykluszeit spielt keine Rolle. Die folgenden Annahmen stammen aus dem Messraster der Firmware und aus meiner Einschätzung eines Produktionstages.

Tabelle 10 - Annahmen und Ergebnis der Kapazitätsberechnung

Einträge pro Tag	**Produktion**	**Lager**	**Lager bei Taupunktnähe**
Klima	144 (alle 10 min)	24 (alle 60 min)	144 (alle 10 min)
Zustandswechsel	20	2	2
Schock, Strom, Konfiguration	6	2	2
Summe	**170**	**28**	**148**
Speicherbedarf pro Tag	4'080 Byte	672 Byte	3'552 Byte
Reichweite	**470 Tage**	**2'857 Tage**	**540 Tage**

Ergebnis

Unter den in Tabelle 10 getroffenen Annahmen ist das Produktionsszenario das speicherintensivste der drei modellierten Fälle; der Speicher reicht dort für rund 470 Betriebstage, im Lager für mehrere Jahre. Häufige Stösse, Zustandswechsel oder Konfigurationsereignisse können jedoch eine höhere Schreibrate verursachen. Zum Vergleich: Bei einer Zykluszeit von 10.5 s ergeben sich in 24 Stunden theoretisch 86'400 / 10.5 ≈ 8'229 Zyklen. Würde jeder Zyklus einen Datensatz belegen, wären die 80'000 Speicherplätze nach rund 80'000 / 8'229 ≈ 9.7 Tagen gefüllt.

Die berechnete Reichweite von rund 470 Tagen gilt für das in Tabelle 10 angenommene Ereignisprofil mit 170 Einträgen pro Tag. Im 75-h-Dauerlauf (Kapitel 12, T2) wurden 797 Einträge geschrieben: 453 Klima-Einträge im 10-Minuten-Raster, 343 Zustandswechsel aus 172 simulierten Unterbrüchen und ein Konfigurationseintrag. Das entspricht rund 253 Einträgen pro Tag und einer rechnerischen Reichweite von rund 316 Tagen. Die höhere Rate gegenüber der Annahme stammt aus der künstlich dichten Unterbruchfolge des Simulators. Auch dieser Fall liegt weit über den geforderten 48 Stunden.

Nachweis der 48 Stunden
Die Anforderung wäre erst verletzt, wenn in 48 Stunden mehr als 80'000 Einträge anfallen, also zwei Tage lang alle 2.2 Sekunden einer. Die periodischen Einträge sind auf 144 pro Tag begrenzt. Gegenüber der angenommenen Dauerproduktion mit 340 Einträgen in 48 Stunden liegt die Reserve bei Faktor 235. Die Anforderung ist damit erfüllt.

Einordnung
Die Berechnung beruht auf Annahmen zur Ereignisrate, nicht auf einer Langzeitmessung. Das Überschreiben nach dem ersten vollen Umlauf wurde in dieser Arbeit nicht erprobt, weil dieser Punkt frühestens nach über einem Jahr erreicht wird.

8.8 Energieversorgungskonzept

Das Sensor-Modul hat zwei Energiequellen. In der Produktion wird es über USB-C versorgt (F08). Eine wiederaufladbare Lithium-Ionen-Zelle des verwendeten Typs NCR18650GA mit einer für die Rechnung angesetzten Nennkapazität von 3'300 mAh überbrückt die Phasen ohne USB-Stromversorgung (W05). Laden und Umschalten übernimmt die Elektronik des FireBeetle (Kapitel 8.3). Die Firmware muss nur wissen, welche Quelle anliegt: USB erkennt sie ohne Zusatzbauteil an der Ruhespannung des USB-Seriell-Wandlers, die Akkuspannung misst sie über den Spannungsteiler des Boards.

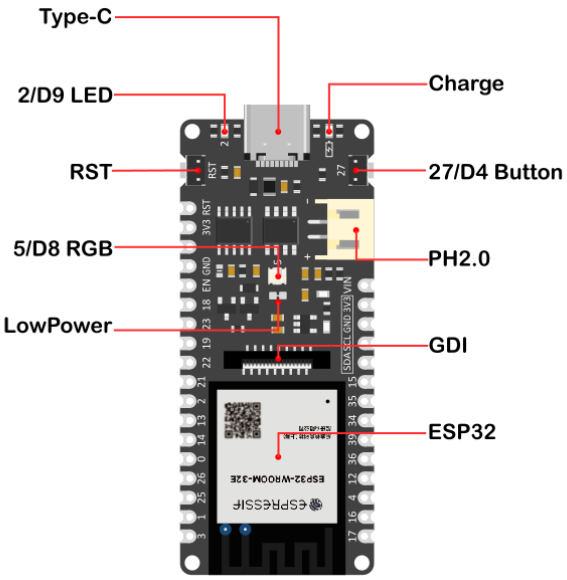


Abbildung 41 - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller (DF Robot, o.D.)

Grundsatz
Mit USB schläft das Gerät nie. Ohne USB richtet sich die Schlaftiefe danach, wie viel gerade passieren kann. Im Transport und bei offenem Werkzeug schläft das Gerät leicht und reagiert auf jedes Signal. Im Lager schläft es tief, bis der Beschleunigungssensor es weckt. Danach bleibt es 15 Minuten im leichten Schlaf, weil Ereignisse selten allein kommen.

Tabelle 11 - Wachheitsstufen im Akkubetrieb und berechnete Laufzeit

Stufe	Einsatz ohne USB	Was weckt	Strom	Laufzeit
Wach, WLAN an	Produktion und Unterbruch. Erste 2 Minuten in Transport und Werkzeug offen.	Entfällt	150 mA	16 h
Light Sleep	Transport, Werkzeug offen, 15 Minuten nach einem Stoss im Lager	Schock, jeder Schalter, USB, Bewegung (nicht im Transport), Timer 60 s	2 mA	50 Tage
Deep Sleep	Lager nach 10 s Ruhe, Werkzeug offen nach 10 Minuten Leerlauf, Akku kritisch	Schock, Bewegung, Timer. Schalter und USB wecken nicht.	0.5 mA	189 Tage

Messraster im Deep Sleep
Der Timer weckt das Gerät nur, um das Klima zu messen: in der ersten Stunde alle 10 Minuten, bis sechs Stunden alle 30, danach alle 60 Minuten. Liegt die Temperatur weniger als 5 °C über dem Taupunkt, bleibt es bei 10 Minuten. So wird dicht gemessen, wo Kondensation droht, und sonst Energie gespart (F01).

8.8.1 Berechnung der Akkubetriebsdauer

Das Pflichtenheft verlangt die maximal mögliche Akkubetriebsdauer (W05). Sie wird für jede der drei Wachheitsstufen einzeln berechnet, weil sich die Ströme um den Faktor 300 unterscheiden. Die Ströme sind Annahmen aus Datenblattwerten und nicht am Gerät gemessen.

Gegeben

Tabelle 12 - Ausgangswerte der Laufzeitberechnung

Zeichen	Bedeutung	Wert	Herkunft
C_{N}	Nennkapazität des Akkus	3'300 mAh	Datenblatt der Zelle Panasonic NCR18650GA (typisch 3'450 mAh)
η	Nutzbarer Anteil der Kapazität	0.727	Annahme: 27 % Reserve für Alterung, Kälte und Abschaltschwelle
I_{W}	Strom im Wachbetrieb mit WLAN	150 mA	Annahme, Messung in Kapitel 12
I_{LS}	Strom im Light Sleep	2 mA	Annahme, Messung in Kapitel 12
I_{DS}	Strom im Deep Sleep	0.5 mA	Annahme, Messung in Kapitel 12
n	Timer-Messungen pro Tag im Deep Sleep	24	Messraster 60 Minuten
I_{A}	Strom während einer Timer-Messung	50 mA	Annahme
t_{A}	Dauer einer Timer-Messung	2 s	Annahme

Schritt 1: Nutzbare Kapazität
Der Akku wird nicht bis zur Nennkapazität ausgenutzt. Die Reserve von 27 % deckt den Kapazitätsverlust über die Lebensdauer.

$$C_{\mathrm{nutz}} = \eta \cdot C_{\mathrm{N}} = 0.727 \cdot 3'300\ \mathrm{mAh} \approx \mathbf{2'400\ mAh}$$

Schritt 2: Wachbetrieb
Im Wachbetrieb fliesst der Strom dauernd.

$$t_{\mathrm{W}} = \frac{C_{\mathrm{nutz}}}{I_{\mathrm{W}}} = \frac{2'400\ \mathrm{mAh}}{150\ \mathrm{mA}} = \mathbf{16\ h}$$

Schritt 3: Light Sleep
Zuerst der Verbrauch pro Tag, dann die Laufzeit.

$$Q_{\mathrm{LS}} = I_{\mathrm{LS}} \cdot 24\ \mathrm{h} = 2\ \mathrm{mA} \cdot 24\ \mathrm{h} = 48\ \mathrm{mAh/Tag}$$

$$t_{\mathrm{LS}} = \frac{C_{\mathrm{nutz}}}{Q_{\mathrm{LS}}} = \frac{2'400\ \mathrm{mAh}}{48\ \mathrm{mAh/Tag}} = \mathbf{50\ Tage}$$

Schritt 4: Deep Sleep
Zum Ruhestrom kommen die Timer-Messungen. Nach sechs Stunden im Schlaf sind es 24 pro Tag.

$$Q_{\mathrm{A}} = n \cdot I_{\mathrm{A}} \cdot t_{\mathrm{A}} = 24 \cdot 50\ \mathrm{mA} \cdot \frac{2\ \mathrm{s}}{3'600\ \mathrm{s/h}} = 0.67\ \mathrm{mAh/Tag}$$

$$Q_{\mathrm{DS}} = I_{\mathrm{DS}} \cdot 24\ \mathrm{h} + Q_{\mathrm{A}} = 0.5\ \mathrm{mA} \cdot 24\ \mathrm{h} + 0.67\ \mathrm{mAh} = 12.67\ \mathrm{mAh/Tag}$$

$$t_{\mathrm{DS}} = \frac{C_{\mathrm{nutz}}}{Q_{\mathrm{DS}}} = \frac{2'400\ \mathrm{mAh}}{12.67\ \mathrm{mAh/Tag}} = \mathbf{189\ Tage}$$

Das 189-Tage-Ergebnis gilt für einen idealisierten stationären Deep-Sleep-Lastfall mit 24 kurzen Aufwachmessungen pro Tag und ohne zusätzliche WLAN-, Stoss- und Nutzeraktivität. Das zeitlich gestufte Messraster in den ersten Stunden und zusätzliche Weckvorgänge führen zu anderen Verbrauchswerten. Die folgende Transportszenariorechnung setzt zudem voraus, dass das Gerät tatsächlich über 42 Tage im Light Sleep verbleibt; sie ist daher ein bewusstes Lastprofil, keine Prognose für jeden realen Seetransport.

Beispiel: Seetransport mit anschliessender Lagerung
Ein Seetransport dauert rund sechs Wochen. Das Gerät verbringt diese 42 Tage im Light Sleep. Für die Lagerung danach bleibt:

$$Q_{\mathrm{T}} = 42\ \mathrm{Tage} \cdot 48\ \mathrm{mAh/Tag} = 2'016\ \mathrm{mAh}$$

$$t_{\mathrm{Rest}} = \frac{C_{\mathrm{nutz}} - Q_{\mathrm{T}}}{Q_{\mathrm{DS}}} = \frac{2'400\ \mathrm{mAh} - 2'016\ \mathrm{mAh}}{12.67\ \mathrm{mAh/Tag}} = \mathbf{30\ Tage}$$

Akkuschutz und Warnsignal
Unter 3.50 V meldet das Gerät «Akku tief». Unter 3.35 V geht es in den Minimalbetrieb: sofort Deep Sleep, Messung nur noch stündlich. Das Pflichtenheft verlangt eine Warnung beim Einlagern ohne Energieversorgung (W06). Umgesetzt ist abweichend davon eine Warnung dort, wo der Akku in Stunden leer wäre: Läuft die Produktion ohne USB, zeigt das Display «KEIN STROM», und der Buzzer warnt höchstens einmal pro Minute. Im Lager ist der Akkubetrieb der Normalfall; dort zeigt das Display den Ladestand. Diese Abweichung von W06 wird in Kapitel 13.1 ausgewiesen.

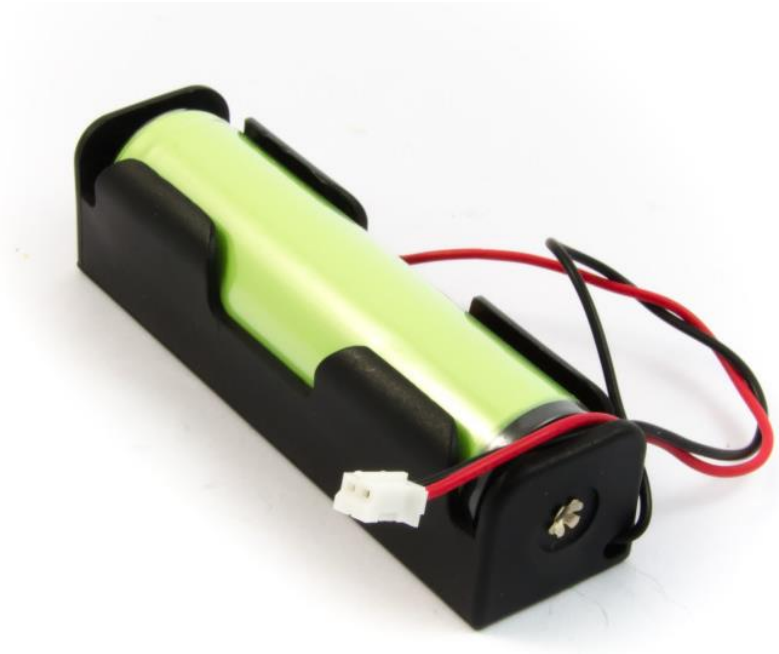


Abbildung 42 - 3300 mAh Akku mit Schutzelektronik und JST Stecker (purecrea GmbH, o.D.)

9 Bedien- und Interaktionskonzept

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 5).

Das Sensor-Modul hat keinen Touchscreen und im Betrieb keine Tasten. Das Display zeigt an, bedient wird im Browser des Smartphones (Kapitel 8.2 und 8.6). Dieses Kapitel beschreibt, was der Anwender tut und was er sieht: von der ersten Inbetriebnahme bis zum Blick auf das Werkzeug im Alltag.

9.1 Bediengrundsätze

Wer das Gerät bedient, ist in Kapitel 6.6 beschrieben: Werkzeugmacher und Einrichter mit mechanischer Ausbildung, geübt im Umgang mit technischen Unterlagen und parametrierbaren Maschinen, ohne Kenntnisse in Netzwerktechnik und Elektronik. Üblicherweise entscheidet der Werkzeugbauer darüber, ob das Gerät überhaupt eingesetzt wird (Kapitel 3.2). Aus diesem Profil folgen sechs Grundsätze. An ihnen messen sich alle Abläufe und Anzeigen dieses Kapitels.

Tabelle 13 - Bediengrundsätze und ihre Umsetzung

Grundsatz	Umsetzung
Kein neues Bediengerät	Bedient wird mit dem eigenen Smartphone im Browser. Keine App, kein Kabel und kein Konfigurationsfile (F07).
Nichts eintippen, was das Gerät selbst weiss	QR-Code statt WLAN-Name und Passwort, automatische Weiterleitung statt IP-Adresse (W04), Uhrzeit vom Zeitserver oder vom Smartphone.
Das Gerät führt	Drei Seiten in fester Reihenfolge, jede mit einem Thema. Die Grenzwerte sind vorbelegt. Der Anwender bestätigt oder passt an.
Sehen statt glauben	Jeder Endschalter zeigt seinen Schaltzustand sofort an. Die Messwerte laufen neben dem Grenzwert mit. Der Warnton lässt sich testen.
Aussagen statt Signale	Angezeigt werden Zustände des Werkzeugs in den Worten des Werkzeugbaus, nicht Rohwerte (Kapitel 6.6.5, W02).
Im Betrieb keine Bedienung	Das Gerät erkennt Produktion, Transport und Lager selbst. Niemand muss umschalten oder quittieren.

9.2 Bedienabläufe und Inbetriebnahme

Inbetriebnahme

Der Anwender schliesst das Gerät am Strom an. Es meldet sich mit einem Ton, und das Display zeigt den Einrichtungs-Bildschirm (Abbildung 44 a). Von da an führt das Gerät in fünf Schritten durch die Einrichtung (F07).

Tabelle 14 - Ablauf der Inbetriebnahme

Nr.	Der Anwender	Das Gerät
1	Scannt den QR-Code auf dem Display.	Nimmt das Smartphone in sein WLAN auf. Die Seite «Netzwerk» öffnet sich von selbst.
2	Wählt «Lokales WLAN» und gibt dessen Zugangsdaten ein, oder wählt «Standalone».	Prüft die Verbindung, stellt die Uhr und quittiert mit einem Ton. Schlägt die Verbindung fehl, meldet es den Fehler und bleibt auf der Seite.
3	Trägt die Werkzeugdaten ein und ordnet die angeschlossenen Endschalter zu.	Zeigt neben jedem Eingang an, ob der Schalter gerade betätigt ist. Eine falsche Zuordnung fällt sofort auf.
4	Bringt das Gerät in Einbaulage, erfasst den Ruhezustand und bestätigt die Grenzwerte.	Misst die Ruhelage und zeigt die aktuellen Messwerte neben den Grenzwerten.
5	Tippt auf «Konfiguration abschliessen».	Speichert, quittiert mit einem Ton und wechselt auf den Betriebs-Bildschirm (Abbildung 44 b). Das WLAN der Einrichtung endet damit.

Konfigurationsparameter
Die Einrichtung fragt nur ab, was das Gerät nicht selbst wissen kann.

Tabelle 15 - Konfigurationsparameter des Sensor-Moduls

Seite	Parameter	Werte, Vorgabe	Zweck
Netzwerk	Betriebsmodus	Lokales WLAN mit Name und Passwort, oder Standalone	Legt fest, wie das Cockpit erreichbar ist (Kapitel 8.6)
Werkzeug	EQ-Nummer	Bis 30 Zeichen	Identität des Werkzeugs auf dem Display und in den Daten. Im Standalone-Modus auch Name des Geräte-WLAN.
Werkzeug	SGWZ-Name, Fachzahl, Komponenten	Freitext, 1 bis 128, 1K bis 4K	Beschriftung des Werkzeugs auf dem Display
Werkzeug	Endschalter 1 bis 4	Funktion aus einer Liste, Auslösung «Beim Schalten» oder «Beim Loslassen»	Legt fest, welcher Eingang die Zyklen zählt (F04). Jede Funktion ist nur einmal wählbar.
Werkzeug	Zyklusstand	Ab 0, Vorgabe 0	Übernahme des bisherigen Zählerstands bei einer Nachrüstung
Grenzwerte	Ruhezustand	Wird auf Knopfdruck gemessen	Bezugswert des Beschleunigungssensors in Einbaulage
Grenzwerte	Bewegungsschwelle	0.02 bis 1.0 g, Vorgabe 0.08 g	Ab wann das Gerät einen Transport erkennt
Grenzwerte	Crash-Schwelle	0.5 bis 2.0 g, Vorgabe 1.5 g	Ab wann ein Schlag als Ereignis gilt (F02)
Grenzwerte	Abstand zum Taupunkt	1.0 bis 15.0 °C, Vorgabe 3.0 °C	Ab wann ein Kondensationsrisiko gemeldet wird (F03)

Betrieb
Im Betrieb bedient niemand das Gerät. Wer wissen will, wie es dem Werkzeug geht, scannt den QR-Code auf dem Display und landet im Cockpit (Abbildung 40 d). Das Smartphone muss dazu im selben Netz sein: im Firmen-WLAN oder, im Standalone-Modus, im WLAN des Geräts. Dessen Name steht oben auf dem Display, das Passwort ist fest hinterlegt (Kapitel 8.6). Oben im Cockpit stehen sechs Kennzahlen: Zyklen, Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Abstand zum Taupunkt und Stromversorgung. Darunter zeigt eine Zeitachse in Farben, wann das Werkzeug produziert hat, unterbrochen war, offen stand, transportiert wurde oder im Lager lag. Schocks sind als Marken eingetragen. Der Ausschnitt lässt sich von Minuten bis Monaten wählen.

Änderung und Zurücksetzen
Die Schaltfläche «Konfiguration» im Cockpit führt zurück auf die Seiten 2 und 3. Vorher verlangt die Seite eine sechsstellige PIN. Das Gerät zeigt sie in diesem Moment auf dem Display an (Abbildung 44 d), sie gilt zwei Minuten. So ändert nur, wer am Werkzeug steht. Jede Änderung wird als Ereignis gespeichert (Kapitel 8.7.1). Eine Taste am Gerät setzt es auf den Auslieferungszustand zurück. Sie muss acht Sekunden gehalten werden, ab der dritten Sekunde tickt der Buzzer. Gelöscht werden Konfiguration und Zählerstand, die gespeicherten Ereignisse bleiben erhalten.

Rückmeldungen
Jede Eingabe wird doppelt quittiert: mit einer Meldung im Browser und mit einem Ton am Gerät. Vier Tonfolgen genügen.

Tabelle 16 - Akustische Rückmeldungen

Tonfolge	Bedeutung
Drei Töne, steigend	Gerät bereit, Eingabe gespeichert
Drei Töne, tief und gleich	Verbindung zum WLAN fehlgeschlagen
Drei Töne, fallend, einmal pro Minute	Produktion ohne Netzstrom (W06, Kapitel 8.8)
Drei kurze und zwei lange Töne, hoch	Schock erkannt (F02)

9.3 Menüstruktur und Display-Layout

Menüstruktur
Auf dem Display gibt es kein Menü. Die Struktur liegt in der Weboberfläche und ist flach: vier Seiten, keine Untermenüs (Abbildung 39). Die Einrichtung läuft in einer Richtung, danach ist das Cockpit die Startseite. Eine fünfte Seite mit Rohwerten dient der Entwicklung und ist nicht verlinkt.

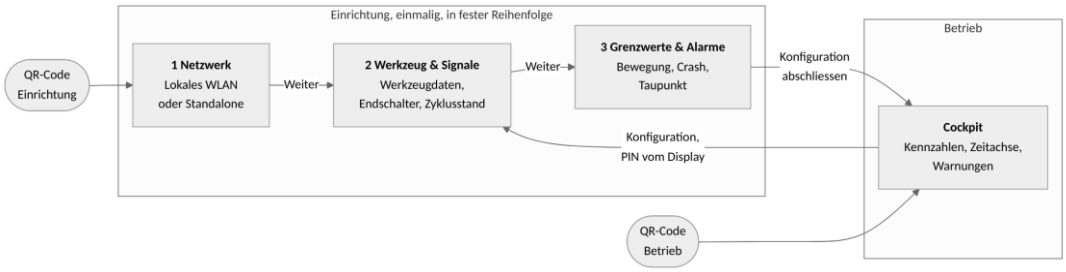
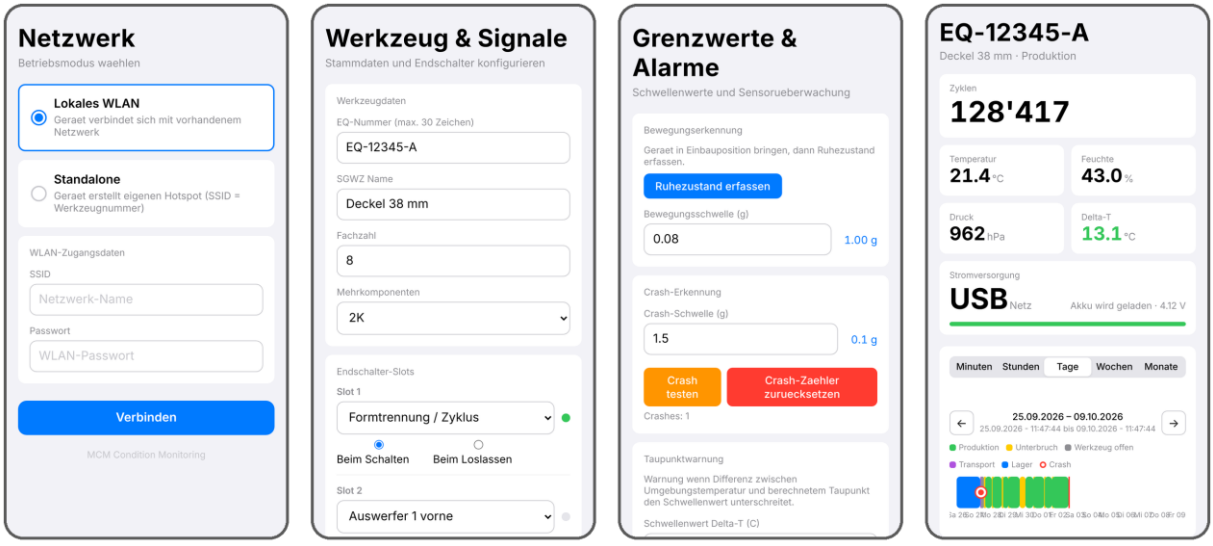


Abbildung 43 - Seiten der Weboberfläche und ihre Verknüpfung (Quelle: Selbst erstellt)

Seiten auf dem Smartphone
Die Seiten der Einrichtung sind gleich aufgebaut (Abbildung 40 a bis c): oben der Titel, darunter Karten mit je einem Thema, unten die Schaltflächen zum Speichern und Weitergehen. Die Gestaltung lehnt sich an die Einstellungen des iPhones an. Der Anwender kennt das Muster und muss es nicht lernen. Was das Gerät gerade misst, steht blau neben dem Grenzwert (c). Der Punkt neben einem Endschalter wird grün, sobald der Schalter betätigt ist (b). Das Cockpit zeigt die Kennzahlen als Kacheln und darunter die Zeitachse (d).



a) Netzwerk b) Werkzeug & Signale c) Grenzwerte & Alarme d) Cockpit

Abbildung 44 - Seiten der Weboberfläche auf dem Smartphone, mit Beispieldaten (Quelle: Selbst erstellt)

Display-Layout
Das E-Ink-Display hat 296 × 152 Bildpunkte. Es kennt sechs Bildschirme (Abbildung 45). Der Aufbau folgt drei Regeln. Links steht der Weg ins Gerät: der QR-Code, darunter die Adresse in Klartext. Rechts steht, was man am Werkzeug wissen will: oben EQ-Nummer, Name und Fachzahl, darunter als grösste Angabe der Zyklenstand. Die Zeile oben rechts zeigt Netzwerk und Stromquelle. Läuft die Produktion ohne Netzstrom, wird sie zum schwarzen Balken (c).



Abbildung 45 - Bildschirme des E-Ink-Displays, nach dem Quellcode gezeichnet (Quelle: Selbst erstellt)

Anzeige ohne Strom
E-Ink hält das Bild ohne Strom. Vor jedem Schlaf zeichnet das Gerät deshalb den Standby-Bildschirm (e): Identität, Zyklenstand, letzte Messwerte und Ladestand. Ein Werkzeug im Lager bleibt so beschriftet, auch wenn der Akku leer ist. Ein Gerät, das nie eingerichtet wurde, sagt in diesem Zustand, was zu tun ist (f).

Zyklenanzeige in der Produktion
Jeder Bildwechsel hält das Programm kurz an. In der Produktion wird die Anzeige deshalb nur alle zehn Zyklen erneuert, und die letzte Stelle zeigt ein X (c). Der Anwender sieht daran, dass gezählt wird. Den genauen Stand zeigt das Cockpit, und nach dem Ende der Produktion auch wieder das Display.

Begriffe
Die Oberfläche verwendet die Begriffe des Werkzeugbaus (W02): Fachzahl, Formtrennung, Auswerfer, Kernzug, Zyklusstand. Die Schaltrichtung eines Endschalters heisst «Beim Schalten» und «Beim Loslassen», nicht steigende und fallende Flanke. Die Zustände heissen Produktion, Unterbruch, Werkzeug offen, Transport und Lager. Wo ein Begriff aus der Informatik nötig ist, erklärt ihn die Oberfläche an Ort und Stelle: «Standalone» mit «Gerät erstellt eigenen Hotspot», «SSID» mit «Netzwerk-Name», «Config PIN» mit der Aufforderung, die auf dem Display angezeigte PIN einzugeben. Der Anwender muss diese Begriffe nicht kennen.

10 Hardware-Entwicklung

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Vorgaben, fachliche Entscheidungen und Prüfung stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 6).

Kapitel 8 hat festgelegt, welche Bauteile das Sensor-Modul hat und wie sie verbunden werden. Dieses Kapitel zeigt, wie daraus ein Gerät wurde: die Schaltung auf einer eigenen Trägerplatine, ein Gehäuse aus dem 3D-Drucker und der Zusammenbau mit Normteilen. Das Ergebnis ist ein produktnaher Prototyp. Er geht über die Abgrenzung in Kapitel 3.4 hinaus, die kein Gehäuse verlangt. Spritzwassergeschützt oder zertifiziert ist er nicht.

10.1 Schaltungsentwurf

Grundsatz

Die Trägerplatine dient primär als Verbindungs- und Adapterplatine für zugekaufte Funktionsmodule: den FireBeetle, das Display, die zwei Sensoren und den Buzzer. Auf der Platine sitzen nur Steckverbinder. Wer das Gerät nachbaut, lötet Stecker ein und steckt Module auf (F13). Die elektrische Versorgung muss sich an den zulässigen Versorgungsspannungen der tatsächlich bestückten Module und ihrer Eingänge orientieren. Abbildung 4246 zeigt den ursprünglich zur Fertigung eingereichten Schaltplan der Leiterplatte V1.0. Der gezeigte Stand stimmt nach der Inbetriebnahme nicht mehr vollständig mit dem funktionsfähigen Prototyp überein; die vorgenommenen Nacharbeiten sind in Tabelle 18 dokumentiert.

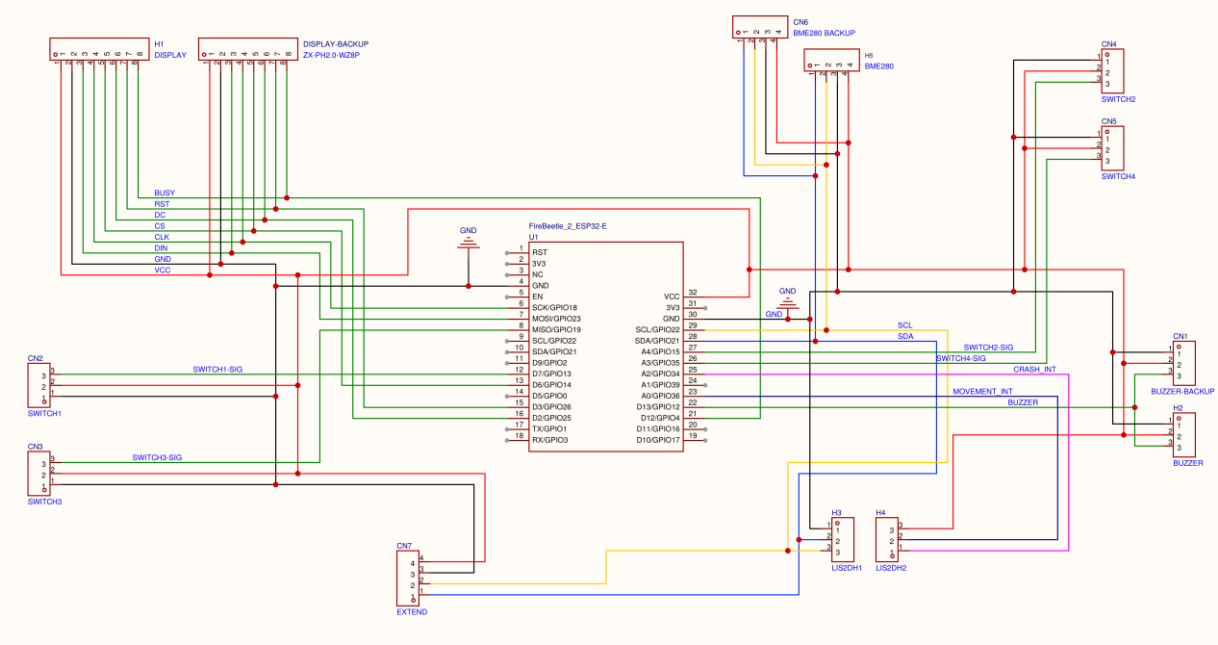


Abbildung 46 - Schaltplan der Trägerplatine, Version 1.0, Stand vor den zwei Korrekturen (Quelle: Selbst erstellt)

Pinbelegung
Die Tabelle zeigt die Belegung, wie sie im Gerät verdrahtet ist und von der Firmware verwendet wird.

Tabelle 17 - Pinbelegung des FireBeetle im Sensor-Modul

Funktion	GPIO	Anschluss
Display (SPI)	18 Takt, 23 Daten, 14 CS, 25 DC, 26 Reset, 4 Busy	Stiftleiste H1 oder JST-PH achtpolig
I2C-Bus	21 SDA, 22 SCL	BME280, LIS2DH und externer Anschluss «E»
LIS2DH Schock (INT1)	39	Stiftleiste H4. Im Schaltplan noch GPIO34.
LIS2DH Bewegung (INT2)	36	Stiftleiste H4
Endschalter 1 bis 4	13, 15, 19, 35	Vier JST-PH dreipolig
Buzzer	12	Stiftleiste H2 oder JST-PH dreipolig
Akkuspannung	34	Auf dem FireBeetle, Spannungsteiler 2 × 1 MΩ
USB-Erkennung, Taste «R»	3, 27	Auf dem FireBeetle

Anschlüsse
Display, BME280 und Buzzer haben je zwei Anschlüsse auf der Platine: eine Stiftleiste für die mitgelieferten Dupont-Kabel und einen JST-PH-Stecker (Kapitel 8.5.1). Die vier Endschalter und der externe I2C-Anschluss sind als JST-PH ausgeführt und damit verpolungssicher (W08). Der externe Anschluss, am Gehäuse mit «E» beschriftet, nimmt den zweiten BME280 auf, der ausserhalb des Gehäuses misst (Kapitel 8.4). Eine Ausnahme ist der LIS2DH: Er braucht neben dem Bus zwei Interrupt-Leitungen, also sechs Adern. Das vierpolige Kabel reicht dafür nicht. Er ist über zwei dreipolige Stiftleisten mit Dupont-Kabeln angeschlossen. Dieser Anschluss liegt im Gehäuse und wird nur einmal gesteckt.

Leiterplatte
Die Platine ist in EasyEDA gezeichnet und bei JLCPCB gefertigt: zwei Lagen, 1.6 mm dick, 104.2 × 82.2 mm. Bestellt wurden 15 Stück für USD 18.00, mit Expressversand USD 42.34. Symbol und Footprint des FireBeetle stammen aus meiner Transferarbeit (Hoti, 2026). Dort war eine Platine mit diesem ESP-Footprint bereits gefertigt und erprobt. Das senkt das Risiko eines Fehlers am Sockel des Mikrocontrollers (R1). Die Schaltung selbst ist für das MCM neu entworfen. Ihr Umriss stammt aus dem CAD-Modell des Gehäuses. Platine und Gehäuse wurden gemeinsam konstruiert, damit beides beim ersten Mal zusammenpasst (Risiko R8). Vor der Bestellung wurde die Platine zudem als Attrappe 3D-gedruckt und im Gehäuse probemontiert, um Kollisionen zu finden, bevor sie Geld und Lieferzeit kosten.



Abbildung 47 - Bestückte Trägerplatine, in die Basis eingebaut (Quelle: Selbst erstellt)

Korrekturen an der gelieferten Platine
Das Risiko R1, ein Fehler auf der ersten Platine, ist eingetreten. Bei der Inbetriebnahme zeigten sich zwei Fehler. Beide liessen sich an der Platine korrigieren. Eine Neubestellung war nicht nötig.

Tabelle 18 - Fehler der Platine Version 1.0 und ihre Korrektur

Befund	Ursache	Korrektur am Prototyp
Module liegen an zu hoher Spannung	Die Versorgung der Module war am Pin VCC des FireBeetle angeschlossen. Er ist nicht geregelt und führt am USB 4.84 V. BME280 und LIS2DH sind bis 3.6 V spezifiziert.	Versorgung auf den geregelten Pin 3V3 umgelegt. Header mit Seitenschneider getrennt und auf der oberseite mit korrektem Pin verbunden.
Akkuspannung nicht messbar	Der Schock-Interrupt des LIS2DH lag auf GPIO34. An diesem Pin hängt auf dem FireBeetle der Spannungsteiler des Akkus. Der Ausgang des Sensors zieht den hochohmigen Teiler herunter: gemessen 0.14 V statt rund 2.1 V.	Interrupt auf den freien Nachbarpin GPIO39 umgelötet. GPIO34 misst nur noch den Akku. Selbes vorgehen wie bei der Spannung,

Der Schaltplan in Abbildung 42 und das CAD-Modell zeigen den Stand vor den Korrekturen. Beides wird für Version 1.1 nachgeführt.

10.2 Gehäuse
Ein Gehäuse war nicht verlangt (Kapitel 3.4). Es ist trotzdem entstanden, und zwar nicht als Hülle um einen fertigen Aufbau, sondern als Teil der Konstruktion: Platine, Bauteile und Gehäuse sind im CAD gemeinsam entworfen.

Von der Skizze zum Gerät
Am Anfang stand eine Handskizze (Abbildung 48): ein einfacher abgerundeter Körper mit dem Display oben, den Anschlüssen an einer Seite und zwei gedruckten Teilen, Basis und Deckel. Diese Aufteilung ist geblieben. Geändert hat sich die Zahl der Anschlüsse, von drei auf fünf. Dazugekommen sind der Akku und die Flansche zur Befestigung am Werkzeug.

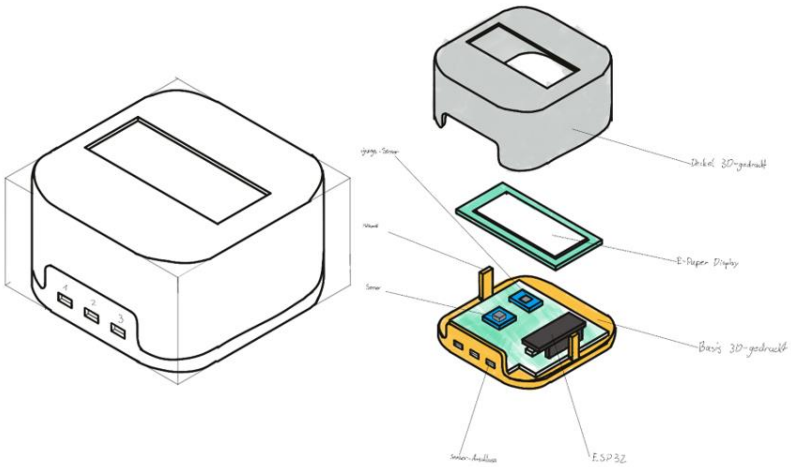
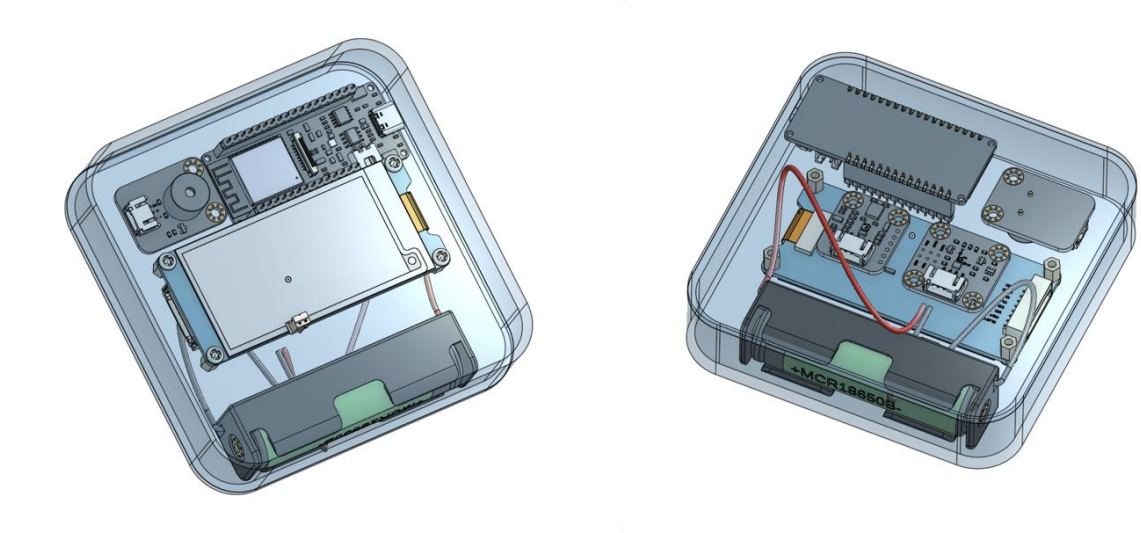


Abbildung 48 - Handskizze des Gehäusekonzepts (Quelle: Selbst erstellt)

Die anfängliche Skizze wurde zuerst ins CAD (Onshape.com) übertragen. Der erste Schritt im CAD war das Ermitteln einer möglichst kompakten Bauform:



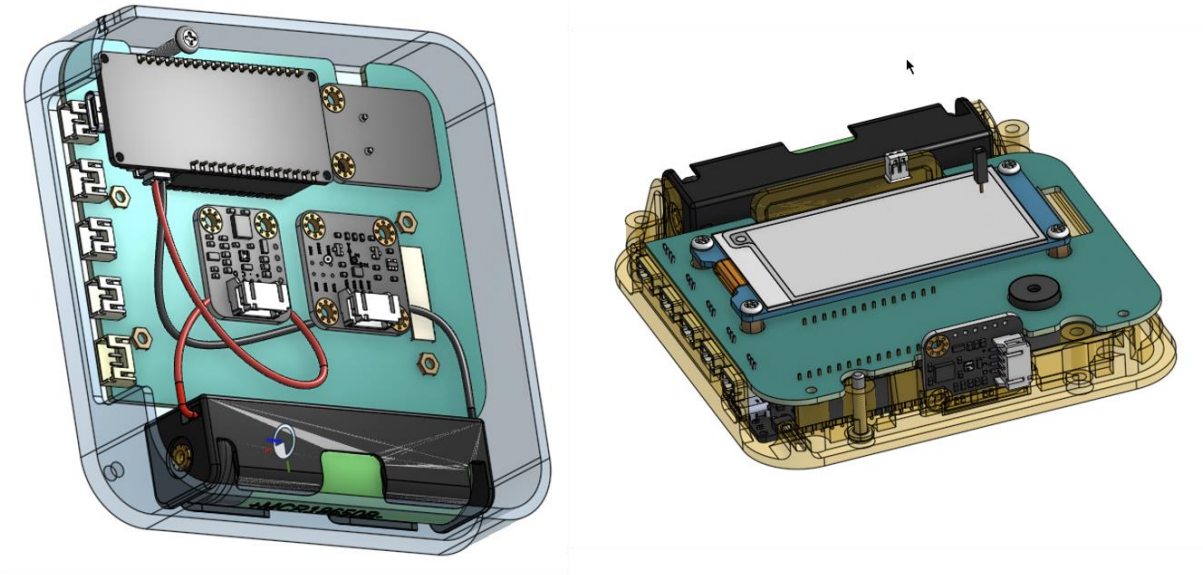
a) CAD-Entwurf von oben

b) CAD-Entwurf von unten

Abbildung 49 - CAD-Entwurf zum frühen Projektstand (Quelle: Selbst erstellt)

Abbildung 49 zeigt den ersten CAD Entwurf. Für diesen mussten erst mal alle darin befindlichen Komponenten mit einer Schieblehre ausgemessen und nachmodelliert werden. Einzelne Komponenten wie etwa das ESP Board oder Anschlussstecker Geometrien waren bereits in der Onshape Bibliothek vorhanden und wurden nur auf die tatsächlichen Abmasse der physischen Modelle angepasst.
Zum Entwurfszeitpunkt ist der interne Aufbau noch nicht final geklärt. Hier werden die Komponenten wild umherbewegt, um eine möglichst platzsparende Anordnung im Gehäuse zu ermöglichen. Die vorgelagerte Skizze Abbildung 48 ist dabei eine grosse Hilfe, da sie Vision beschreibt, an der man sich im CAD richten kann.

Um eine kompakte Bauform zu erhalten werden die Komponenten bereits früh in einer Baugruppenumgebung entwickelt. Das hat den Vorteil, dass CAD Anwender nicht isoliert Teile konstruieren die sich gegenseitig beeinflussen.



a) CAD-PCB angedacht

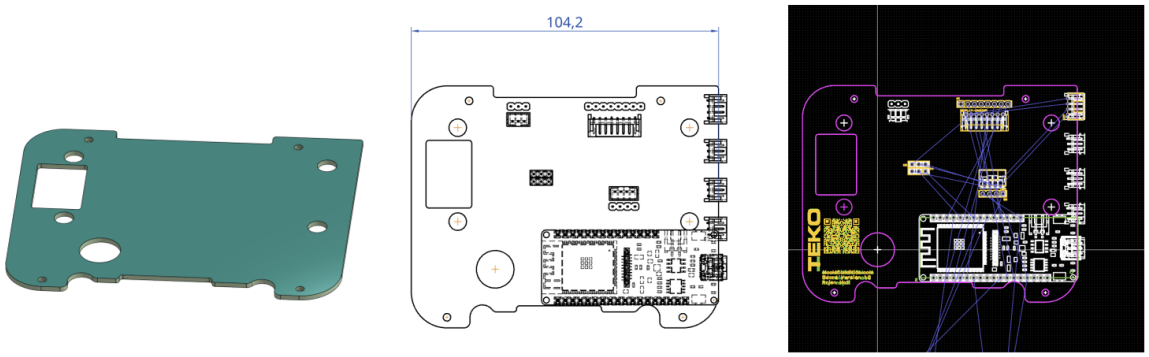
b) CAD Sensor Umgebung versetzt

Abbildung 50 - Zwischenschritte in der CAD Entwicklung (Quelle: Selbst erstellt)

Bereits nach einigen Stunden konnte sich ein platzsparender Aufbau, welcher mit PCB realisierbar ist, finden lassen.

Abbildung 50 a) Zu diesem Zeitpunkt ist der Gesamtaufbau immer noch schematisch und nicht präzise. Änderungen sind nicht komplex und schnell realisiert.
Abbildung 50 b) Zu diesem Zeitpunkt ist der Gesamtaufbau weiter fortgeschritten. Eine Änderung wie das komplette umpositionieren des Umgebungssensors hat einen grossen Einfluss auf das Gesamtsystem und bedarf vielen einzelnen Änderungen. Der Sensor in diesem Beispiel musste versetzt werden, da er im Gehäuse inneren kaum einen Luftstrom verspüren kann. Auch durch die neue Position ist der Sensor nicht perfekt positioniert und misst immer noch das geräteinnere. Es ist aber der bestmögliche Platz mit dem Funktions-Kompromiss bei dieser Gestaltung. Zu sehen sind auch diverse Durchdringungen am PCB dass ein Multi-Layer-Geräteaufbau realisiert werden kann.

Sobald eine Geometrie entsteht die für die PCB Erstellung nutzbar ist kann mit dem folgenden Prozess vorangegangen werden. Dies ist aber nur notwendig wenn kein CAD mit PCB Funktionalität vorhanden ist. In der aktuellen Arbeit wurde das Gratis-CAD Onshape verwendet, welches keine PCB Entwicklung in der Free-Lizenz enthält.



a) 3D-CAD PCB Grundform

b) 2D-CAD PCB DXF Export

c) PCB-DXF in PCB-Layout-Tool importiert

Abbildung 51 - PCB vom 3D zu 2D (Quelle: Selbst erstellt)

Abbildung 51 a) Zeigt die Grundgeometrie des PCB als Volumenkörper. Dieser wird mit allen notwendigen geometrischen Funktionen ausgestattet und sollte idealerweise nach dem erstellen des PCB's nicht mehr verändert werden. Jede Änderung nach dem Export kann Unstimmigkeiten zwischen den beiden Datenständen hervorrufen.

Abbildung 51 b) Zeigt die Grundgeometrie des PCB als 2D Zeichnung. Darauf sichtbar sind auch die Komponentenpositionen. Dieser Vorschritt mit der Zeichnungserstellung ist relevant, dass im PCB Tool anschliessend die korrekte Komponentenposition gefunden werden kann. Die Geometrie wird anschliessend als DXF (Drawing Exchange Format) exportiert. Hierbei handelt es sich um ein Format welches in diversen Tools verwendet werden kann.

Abbildung 51 c) Zeigt die importierte Geometrie in Easy-EDA, einem kostenlosen online PCB Designer. Hier konnte das DXF aus c) importiert werden. Die Komponenten werden deckungsgleich an die korrekte Stelle geschoben. Ebenfalls ist das Platzieren eigener Grafiken möglich. Hier wurde unter anderem der QR-Code der Projektwebseite sowie das TEKO Logo auf beiden Seiten des PCB geladen.

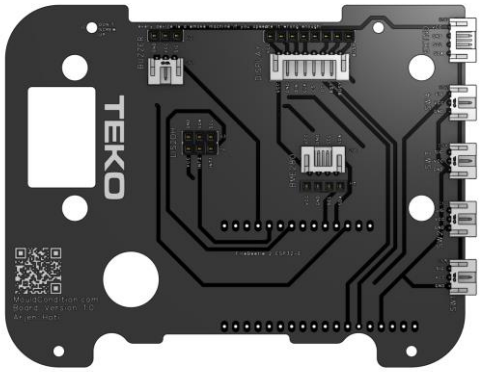
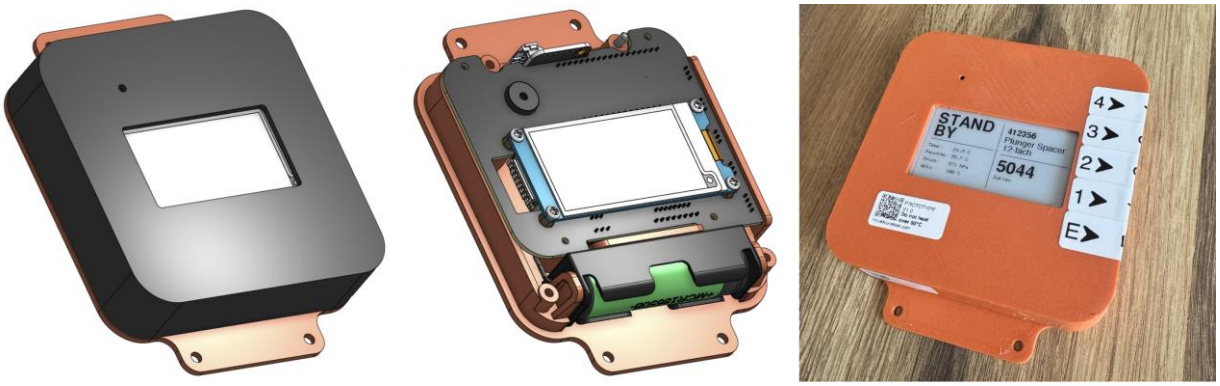


Abbildung 52 - Fertiger PCB zurück im 3D-CAD

Das Ergebnis
Das MCM ist eine geschlossene, tragbare Einheit (Abbildung 45). Es wird als Ganzes ans Werkzeug geschraubt und als Ganzes wieder abgenommen. Im Betrieb wird es nie geöffnet. Das Gehäuse misst 110 × 110 mm bei 27.6 mm Höhe. Darüber hinaus ragen nur die zwei Flansche für die Verschraubung. Auf dieser Fläche sind Mikrocontroller, Display, zwei Sensoren, Buzzer, Akku, Trägerplatine und sechs Anschlüsse nach aussen untergebracht.



a) CAD-Modell, geschlossen b) CAD-Modell, Deckel abgenommen c) Gedruckter Prototyp

Abbildung 53 - Gehäuse im CAD und als gedruckter Prototyp (Quelle: Selbst erstellt)

Konstruktionsprinzipien
Die Konstruktion folgt acht Prinzipien. Jedes ist eine bewusste Entscheidung, und jedes ist am Modell sichtbar. Die folgenden Abschnitte belegen sie mit Ansichten aus dem CAD.

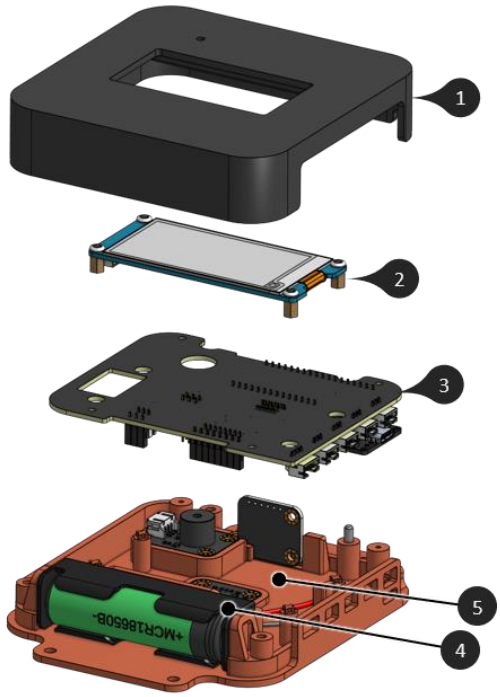
Tabelle 19 - Konstruktionsprinzipien des Gehäuses

Prinzip	Umsetzung	Wirkung
Eine geschlossene Einheit	Das Modul wird als Ganzes montiert und getragen. Gehäuseschrauben und Zurücksetzen liegen auf der Unterseite.	Am Werkzeug lässt es sich weder öffnen noch zurücksetzen.

Prinzip	Umsetzung	Wirkung
So klein wie möglich	110 × 110 × 27.6 mm. Die Module liegen unter der Platine, in dem Raum, den der FireBeetle ohnehin braucht.	Am Werkzeug fehlen erfahrungsgemäss immer ein paar Millimeter.
Jedes Bauteil hat seinen Platz	Gedruckte Rahmen, Führungen und Stützen für Module, Platine, Display und Akku	Der Nachbauer legt ein. Er richtet nichts aus.
Spielfrei von sechs Seiten	Kompensationsnasen ringsum, Auflage unten, Platine oben. Der Akku ist eingeklemmt.	Beim Schütteln bewegt sich nichts. Ein Gerät, das Schläge misst, darf selbst keine erzeugen.
Toleranzen sind eingeplant	Die Nasen nehmen die Masstoleranz der Module auf, die Fuge am Deckel die Höhentoleranz des Stapels.	Zugekaufte Module passen ohne Nacharbeit.
Druckbar für jeden	Beide Teile liegen flach auf dem Druckbett. Keine Stützstruktur, Standardeinstellungen, Düse 0.4 mm.	Nachbau ohne Druckerfahrung (F13)
Nur Normteile, kein Gewinde im Kunststoff	Mutterntaschen für M3, vorgedruckte Kernlöcher für selbstschneidende Schrauben, M4 zum Werkzeug	Die Verschraubung reisst nicht aus. Die Teile sind überall erhältlich (W09).
Schnittstellen integriert	USB-C und fünf Buchsen in einer Wand der Basis. Das Display liegt vertieft hinter dem Fenster.	Nichts steht vor.

In Zahlen: zwei Druckteile, acht Schrauben für den Zusammenbau, vier für die Montage. Keine Stützstruktur, kein geschnittenes Gewinde, kein Justierschritt.

Aufbau in Ebenen
Das Gerät ist in Ebenen gestapelt (Abbildung 54). Die Reihenfolge von unten nach oben ist zugleich die Reihenfolge beim Zusammenbau.



1 Deckel: Wird über die Basis gestülpt. Er hat das Fenster, die Öffnungen und die Taschen für die Muttern.

2 Display: Sitzt mit seinen vier Abstandsbolzen direkt unter dem Fenster.

3 Trägerplatine: Der FireBeetle hängt an ihrer Unterseite, die Buchsen der Anschlussreihe sitzen am Rand. Eine runde Aussparung lässt den Buzzer durch.

4 Module und Akku: LIS2DH, Buzzer und BME280 sitzen nicht auf der Platine, sondern darunter in der Basis. Der Akku liegt davor.

5 Basis: Trägt alle Bauteile. An ihr sitzen die Flansche, über die das ganze Modul am Werkzeug verschraubt wird.

Der Stapel ist ein Sandwich. Nach dem Verschrauben ist jedes Teil von unten und von oben gehalten. Der LIS2DH liegt direkt auf dem Boden des MCM.

Abbildung 54 - Explosionsansicht des Sensor-Moduls (Quelle: Selbst erstellt)

Aufnahmen in der Basis

Jedes Bauteil hat in der Basis seine gedruckte Aufnahme (Abbildung 55). Auch die Kabel sind im CAD modelliert (b). Damit ist am Modell geprüft, dass sie zwischen Basis und Platine Platz finden und auch die korrekte Kabellänge kann ermittelt werden.

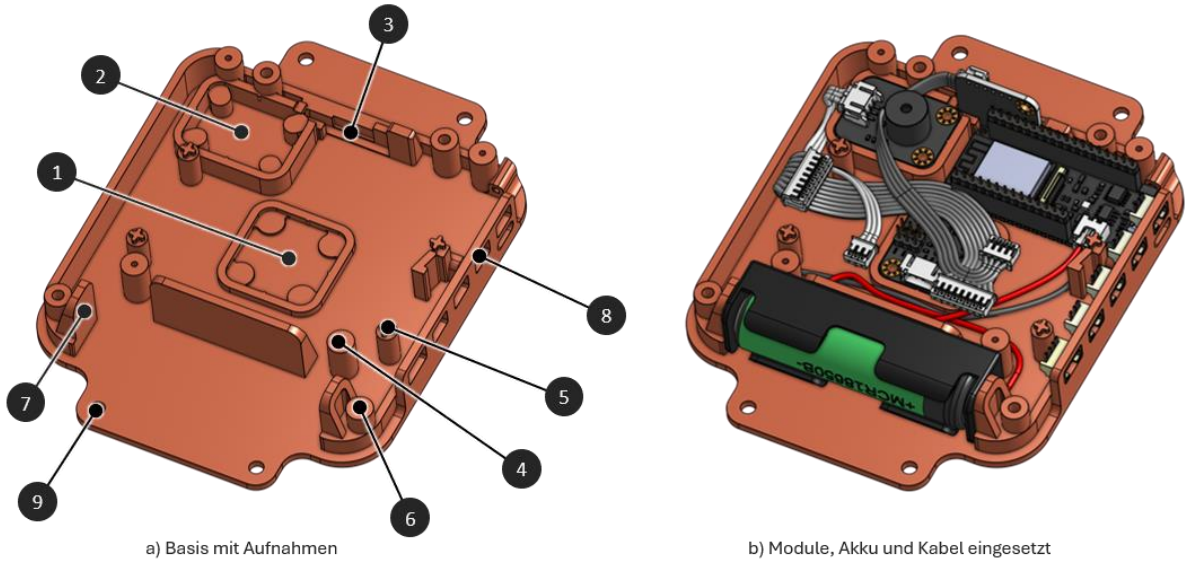


Abbildung 55 - Basis des Gehäuses: Aufnahmen und eingesetzte Bauteile (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 20 - Aufnahmen in der Basis, Nummern gemäss Abbildung 47 a

Nr.	Aufnahme	Funktion
1	Rahmen für den LIS2DH	Vier Auflagen und ein umlaufender Rahmen mit Kompensationsnasen. Das Modul sitzt spielfrei.
2	Rahmen für den Buzzer	Gleich aufgebaut. Der Schallgeber ragt durch die Aussparung der Platine bis unter die Schallöffnung im Deckel.
3	Führung für den BME280	Das Modul steht hochkant in einem Schlitz an der Rückwand, direkt bei den Luftschlitzen.
4	Stützen für die Platine, 4 ×	Tragen die Platine auf der richtigen Höhe. Die selbstschneidenden Schrauben greifen in vorgedruckte Kernlöcher.
5	Stützen für das Display, 4 ×	Greifen mit einem Kreuz durch die Bohrungen der Platine und tragen die Abstandsbolzen des Displays.
6	Dome für die Gehäuseschrauben, 4 ×	Die Schrauben M3 werden von unten eingesetzt und führen in die Mutterntaschen des Deckels. Ihre Köpfe sind versenkt.
7	Akkuhalter	Zwei Klemmbügel und eine Wand. Der Akku wird mit seiner Halterung eingeklemmt und kann sich nicht bewegen.
8	Anschlusswand	Fenster für die fünf JST-PH-Buchsen und für USB-C. Die Buchsen sitzen auf der Platine und treffen die Fenster ohne Nacharbeit.
9	Flansche	Vier Bohrungen für M4, Lochbild 50 × 130 mm.

Abbildung 56zeigt die Passprobe am gedruckten Teil, bevor es die Platine gab: LIS2DH und Buzzer sitzen in ihren Rahmen, der Akku in seinem Halter. Der FireBeetle ist nur lose eingelegt.

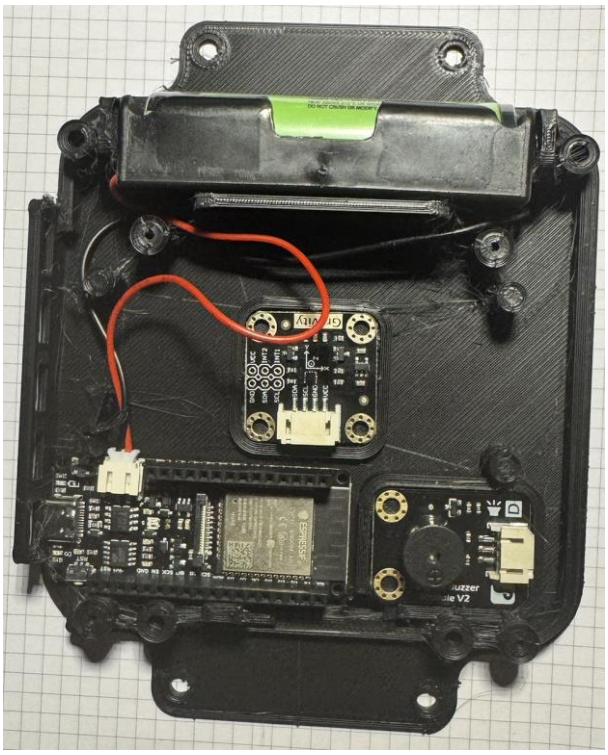


Abbildung 56 - Passprobe an der Version V0: Module in der Basis, vor der Bestellung der Platine (Quelle: Selbst erstellt)

Spielfrei von sechs Seiten
Ein zugekauftes Modul ist nie genau so gross wie im Datenblatt. Der Rahmen ist deshalb ringsum 0.4 mm grösser als das Modul. Vier Nasen, eine pro Seite, stehen genau diese 0.4 mm vor (Abbildung 49 a). Das Modul lässt sich einlegen und sitzt an den Nasen ohne Spiel. Unten liegt es auf vier Auflagen, oben hält es die Platine nieder. Jedes Modul ist so von sechs Seiten gefasst. Der Akku wird mit seiner Halterung zwischen zwei Bügel und eine Wand geklemmt (c). Schüttelt man das Gerät, bewegt sich nichts. Für ein Gerät, das Schläge misst, ist das keine Nebensache: Ein loses Teil im Innern würde selbst Schläge erzeugen.

Die Stützen des Displays enden in einem Kreuz statt in einem runden Zapfen (b). Sie greifen durch die Bohrungen der Platine. Ein runder Zapfen müsste dafür dünner werden und wäre schwach. Das Kreuz nutzt den Durchmesser der Bohrung aus und lässt sich solide drucken.

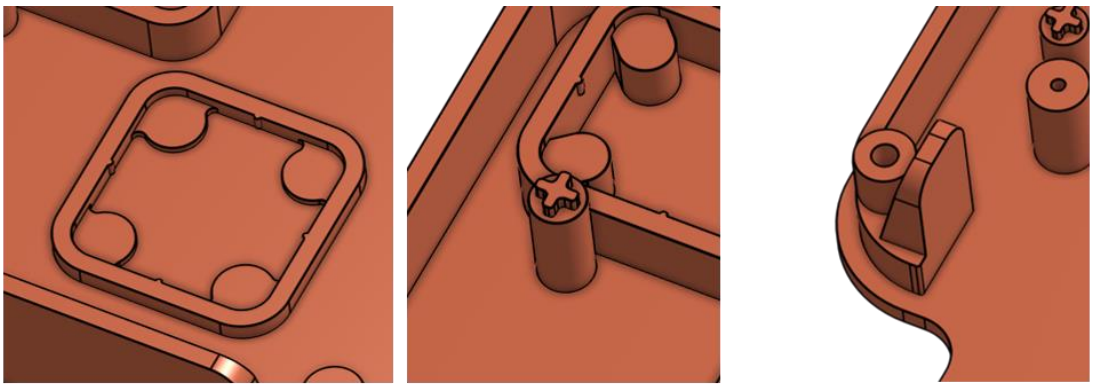
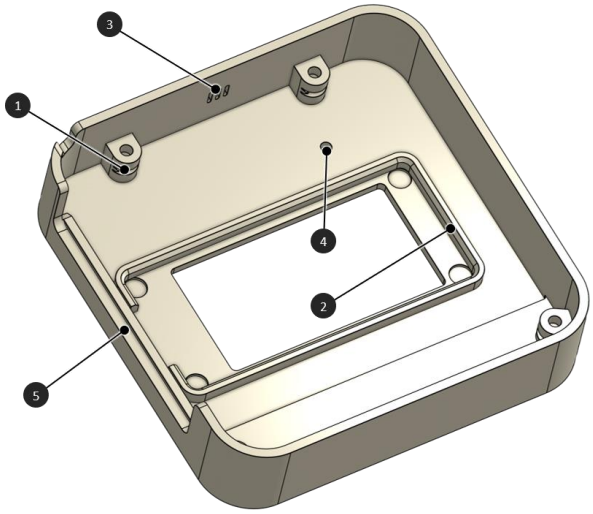


Abbildung 57 - Details der Basis: Kompensationsnasen, Kreuzstütze, Klemmbügel (Quelle: Selbst erstellt)

Details im Deckel
Der Deckel hat keine Elektronik. Seine Innenseite übernimmt drei Aufgaben (Abbildung 50): Sie hält die Muttern, zentriert das Display und trägt die Öffnungen.



1 Mutterntaschen, 4 ×. Die Mutter M3 wird seitlich in einen Schlitz geschoben und ist dort gefangen. Beim Verschrauben muss niemand gegenhalten. Es gibt kein Gewinde im Kunststoff, das ausreissen kann.

2 Zentrierung des Displays. Ein Rahmen umschliesst das Display, vier Senkungen nehmen seine Schraubenköpfe auf. Das Display sitzt damit mittig im Fenster, ohne dass etwas justiert wird. Für die einfache Positionierung besitzt die Geometrie eine Einlaufschräge die das Display vorzentriert.

3 Luftschlitze. Direkt beim BME280, für den Luftaustausch der Klimamessung.

4 Schallöffnung. Bohrung 3 mm genau über dem Buzzer.

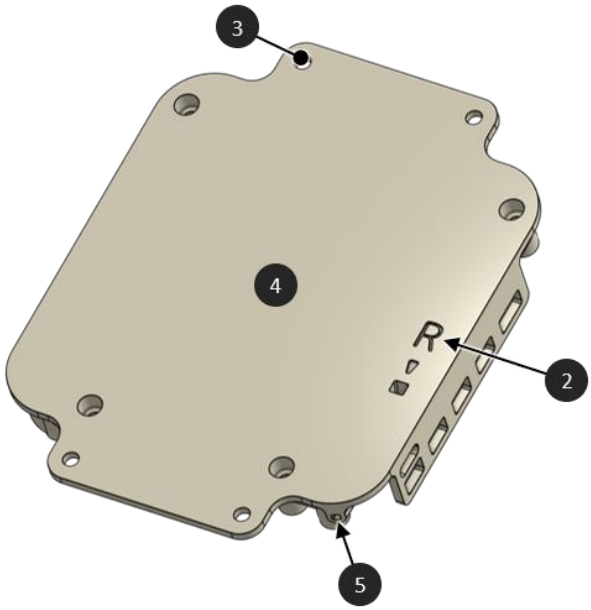
5 Aussparung. Der Deckel greift um die Anschlusswand der Basis. Die Fenster der Buchsen liegen damit im selben Teil wie die Platine und passen immer.

Abbildung 58 - Deckel von innen (Quelle: Selbst erstellt)

Zwischen dem Rand des Deckels und der Basis bleibt ringsum eine Fuge. Sie ist kein Zufall. Die gestapelten Bauteile sind nie genau gleich hoch. Die Fuge nimmt diesen Unterschied auf: Der Deckel klemmt den Stapel, ohne vorher am Rand aufzusitzen. Von aussen sieht sie aus wie eine gewollte Trennlinie. So wirkt schon der Prototyp wie ein Serienteil.

Unterseite

Die Unterseite ist die Auflagefläche am Werkzeug (Abbildung 59). Sie ist plan, nichts steht vor. Was hier liegt, ist am Werkzeug verdeckt. Das ist Absicht.



1 Gehäuseschrauben, 4 ×. Die Köpfe sind versenkt. Solange das Modul am Werkzeug sitzt, lässt es sich nicht öffnen.

2 Zurücksetzen. «R», ein Pfeil und eine schräge Öffnung zur Taste des FireBeetle. Zurückgesetzt wird das Modul nur, wenn es auf ein anderes Werkzeug wandert. Dafür ist es ohnehin abgeschraubt. Der Neustart dagegen ist auch im montierten Zustand möglich.

3 Bohrungen für M4, 4 ×. Lochbild 50 × 130 mm.

4 Auflagefläche. Direkt über dem Boden sitzt der LIS2DH.

5 Neustart. Der Neustart-Button ist mit einer Büroklammer auch im eingebauten Zustand erreichbar.

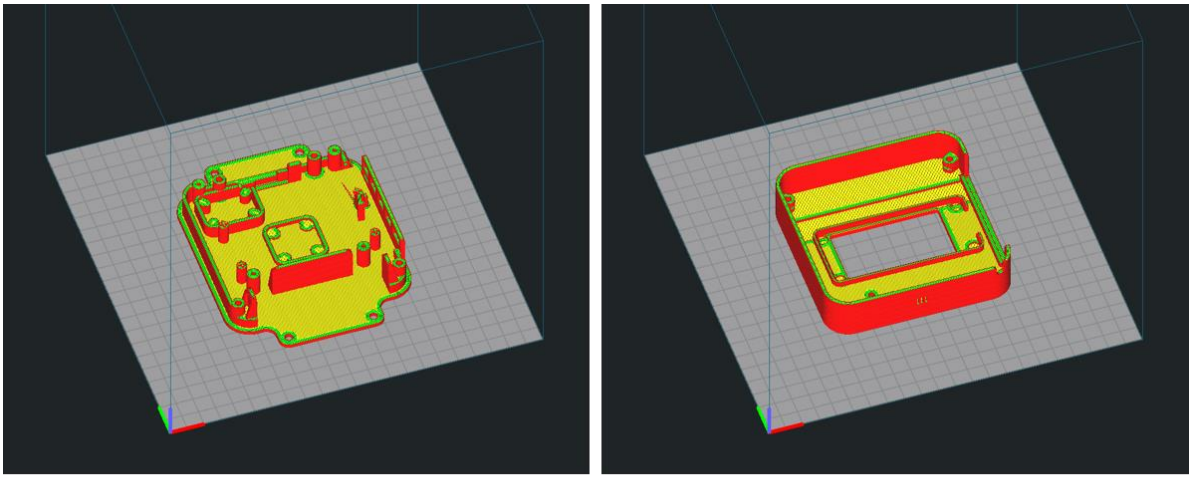
Abbildung 59 - Unterseite des Moduls (Quelle: Selbst erstellt)

Schnittstellen nach aussen
Alle Schnittstellen sind im Gehäuse integriert. Keine Buchse steht vor, kein Kabel wird durch eine offene Wand geführt.

Tabelle 21 - Schnittstellen des Gehäuses nach aussen

Element	Ausführung	Zweck
Fenster	Ausschnitt im Deckel über dem Display	Anzeige
USB-C	Öffnung in der Anschlusswand	Versorgung, Laden, Firmware (F08)
Anschlüsse E, 1 bis 4	Fünf JST-PH-Buchsen in einer Reihe, am Deckel beschriftet	Externer Sensor und vier Endschalter
Neustart	Kleine Öffnung, mit einer Büroklammer erreichbar, auch am Werkzeug	Reset-Taste des FireBeetle. Die Daten bleiben erhalten.
Zurücksetzen «R»	Öffnung auf der Unterseite. Ein kleiner Schraubenzieher wird schräg in Pfeilrichtung eingeführt.	Taste an GPIO27, Auslieferungszustand (Kapitel 9.2)
Befestigung	Zwei Flansche mit vier Bohrungen für M4	Verschraubung des ganzen Moduls am Werkzeug

Druckgerecht konstruiert
Beide Teile liegen flach auf dem Druckbett und kommen ohne Stützstruktur aus. Gedruckt wird mit Standardeinstellungen, einer Düse von 0.4 mm und 100 % Füllung.
Schichthöhe 0.2mm. (Unterseite 6:28 h; 66g , Deckel 4:47 h; 63g)



a) Unterseite auf 3D-Druckbett b) Deckel auf 3D-Druckbett

Abbildung 60 - Gehäuseorientierung auf 3D-Druckbett (Quelle: Selbst erstellt)

Wer einen 3D-Drucker bedienen kann, kann das Gehäuse drucken. Die Masse richten sich nach der Düse. Böden, Innenwände und Rahmen sind 2.4 mm stark, also genau sechs Bahnen. Eine Wand aus ganzen Bahnen hat keine Lücken und ist so fest, wie der Druck es hergibt. Nasen und Fuge messen 0.4 mm, die Luftschlitze 1.2 mm.

Eine Iteration
Das Risiko R8, ein Gehäuse, das nicht zur Platine passt, ist einmal eingetreten. In der ersten Version (V0) stiess das Display an Lötstellen der Platine darunter. Sie bauten höher auf als gemessen, und die gedruckte Attrappe der Platine hatte keine Lötstellen. In der zweiten Version (V1.0) sitzt das Display 1.6 mm weiter aussen. Die Korrektur kostete eine Änderung im CAD und einen neuen Druck. Abbildung 52 zeigt die erste Version.

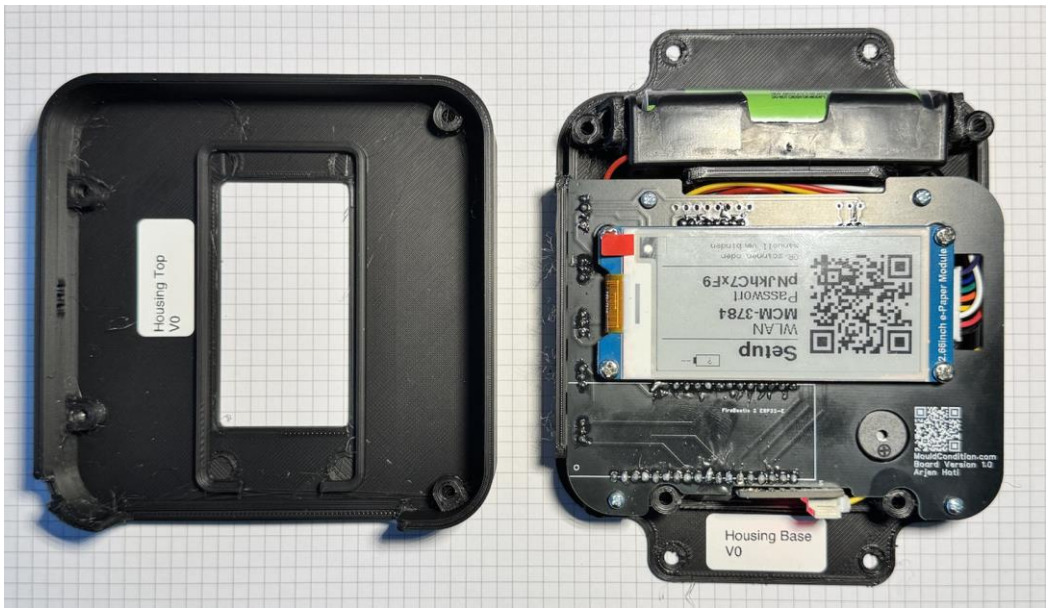


Abbildung 61 - Version V0 in Schwarz: Deckel von innen und Basis mit bestückter Platine (Quelle: Selbst erstellt)

Material und Grenzen
Gedruckt ist das Gehäuse aus PLA: Version V0 in Schwarz, Version V1.0 in Orange. Orange passt zum Farbkonzept der Kabel (Kapitel 8.5.4). PLA wird ab rund 60 °C weich. Der Prototyp trägt deshalb einen Warnhinweis und eignet sich nur für Montageorte unter dieser Temperatur. Für wärmere Stellen am Werkzeug braucht es ein anderes Druckmaterial, die Konstruktion bleibt gleich.

Das Gehäuse ist nicht dicht. Luftschlitze und Stecköffnungen sind offen, eine Schutzart ist nicht nachgewiesen. Der BME280 steht an der Aussenwand bei den Luftschlitzen, so weit vom FireBeetle entfernt, wie es ohne ein grösseres Gehäuse möglich war. Die Kompaktheit hatte Vorrang. Für genaue Raumwerte gibt es den externen Anschluss «E» (Kapitel 8.4).

Zulässige Temperatur am Montageort: Die Grenze setzt nicht das Gehäuse, sondern der Akku: Li-Ion-Zellen dürfen nach Datenblatt nur zwischen 0 und 45 °C geladen werden (Panasonic NCR18650GA), und in der Produktion lädt das Modul dauernd über USB. Danach folgen PLA (Formbeständigkeit bis rund 60 °C), Sensoren und ESP32 (85 °C). Als konstruktive Randbedingung des Prototyps wird ein Ladebetrieb ausserhalb des zulässigen Temperaturbereichs ausgeschlossen; eine Ladesperre ist in dieser Version nicht umgesetzt. Das am Werkzeug tatsächlich erreichte Temperaturniveau hängt von Einbauort, Maschinenbetrieb und Wärmeübertragung ab; die Aussenseite der Aufspannplatte, möglichst weit von Heisskanal und Temperierkreislauf und bei Bedarf mit Abstandshaltern, wird deshalb nur als möglicher, vor dem Einsatz thermisch zu prüfender Montageort genannt. Die mechanische Beständigkeit des PLA-Gehäuses und die Grenzwerte der übrigen Bauteile bleiben unabhängig davon zu berücksichtigen. Alternative Druckmaterialien und eine Ladeabschaltung sind in Kapitel 15 erwähnt.

10.3 Aufbau und Stückliste

Zusammenbau

Der Zusammenbau braucht einen Lötkolben und einen Kreuzschlitz-Schraubenzieher. Verwendet werden nur Normteile. Die Aufnahmen aus Kapitel 10.2 geben jede Position vor.

Tabelle 22 - Zusammenbau des Sensor-Moduls

Nr.	Schritt	Verbindung
1	Steckverbinder auf die Platine löten	Lötstellen
2	LIS2DH und Buzzer in ihre Rahmen legen, BME280 in die Führung stellen, Akku einsetzen	Eingelegt, keine Schrauben
3	FireBeetle auf die Platine stecken, Kabel der Module und des Akkus anschliessen, Platine auf die Stützen setzen	4 selbstschneidende Schrauben
4	Display auf die Stützen setzen und anstecken	Gehalten zwischen Stützen und Deckel
5	Muttern in die Taschen des Deckels schieben, Deckel aufsetzen, von unten verschrauben	4 Schrauben M3 mit Muttern
6	Modul als Ganzes am Werkzeug befestigen	4 Schrauben M4

Stückliste

Die Stückliste weist die Kosten für ein Gerät aus, also für den Nachbau. Die Preise der Positionen 1 bis 9 stammen aus der Bestellung bei Bastelgarage (Auftrag 186622) und enthalten die Mehrwertsteuer.

Tabelle 23 - Stückliste für ein Sensor-Modul

Pos.	Bauteil	Qty	CHF / Stück	CHF Pos	Bezug
1	FireBeetle 2 ESP32-E mit Buchsenleisten	1	13.90	13.90	Bastelgarage
2	E-Ink-Display 2.66 Zoll, 296 × 152	1	18.90	18.90	Bastelgarage
3	Trägerplatine, USD 42.32 bei 15 Stück	1	2.82	2.82	JLCPCB
4	Gravity BME280	1	17.90	17.90	Bastelgarage
5	Gravity LIS2DH	1	10.90	10.90	Bastelgarage
6	Gravity Buzzer	1	3.90	3.90	Bastelgarage
7	Li-Ion-Akku NCR18650GA, 3'300 mAh, mit Schutzelektronik	1	13.90	13.90	Bastelgarage
8	Gravity Endschalter mechanisch, mit Kabel	1	4.90	4.90	Bastelgarage
9	Selbstschneidende Schraube 2.5 x 6	4	0.06	0.24	Eigener Keller, Bossard
10	M3 x 18 Schraube aus Schraubenset	4	0.20	0.80	Landi
11	M3 Mutter aus Schraubenset	4	0.20	0.80	Landi
12	Deckel aus PLA	1	2.30	2.30	Eigener Keller
13	Basis aus PLA	1	2.50	2.50	Eigener Keller
14	4-pin 90° JST Buchse	2	0.11	0.22	Digikey
15	3-pin 90° JST Buchse	5	0.11	0.55	Digikey
16	8-pin 90° JST Buchse	1	0.23	0.23	Digikey
17	Female Dupont Header 2x 2.54	3	0.50	1.50	Eigener Keller
18	Male Dupont Header 40x 2.54	1	0.80	0.80	Bastelgarage
19	8-Pin JST Kabel 10 cm Same Side	1	0.52	0.52	Aliexpress
20	4-Pin JST Kabel 10 cm Same Side	1	0.27	0.27	Aliexpress
21	3-Pin JST Kabel 10 cm Same Side	1	0.24	0.24	Aliexpress
21	3-Pin JST Kabel 20 cm Same Side	1	0.28	0.28	Aliexpress
	Total			**98.37**	

Auch mit Platine, Steckern, Schrauben und Filament bleibt das Gerät unter dem Budget von 300 CHF (W07).
Alle Teile sind als Privatperson bestellbar (W09), die Kabel der Sensoren und Endschalter sind vorkonfektioniert (W10).

11 Firmware-Entwicklung

Dieses Kapitel und die Firmware wurden mit Unterstützung von Claude (Anthropic) entwickelt; Architektur, Anforderungen, Tests am Gerät und Abnahme stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 7 und 8).

Die Firmware ist in C++ in der Arduino-Umgebung für den ESP32 geschrieben. Sie besteht aus einem Hauptprogramm und zehn eigenen Modulen mit rund 5'900 Zeilen. Ein Drittel davon sind die Webseiten. Für Display, BME280, JSON und QR-Code werden frei verfügbare Bibliotheken verwendet (GxEPD2, Adafruit BME280, ArduinoJson, QR Code generator von Project Nayuki). Die Konzepte für Kommunikation, Speicher und Energie stehen in den Kapiteln 8.6 bis 8.8, die Bedienung in Kapitel 9. Dieses Kapitel zeigt, wie sie im Code umgesetzt sind: zuerst der Aufbau, dann die Abläufe, dann die einzelnen Funktionen. Der Quellcode liegt im Anhang D (F12).

Was die Firmware leistet
Das Gerät beantwortet zu jedem Zeitpunkt vier Fragen zum Werkzeug: Wie viel hat es produziert (Zykluszähler), was macht es gerade (einer von fünf Zuständen), was ist ihm zugestossen (Schocks mit Spitzenwert) und unter welchen Bedingungen steht es (Klima und Taupunkt). Jede Antwort wird mit Zeitstempel im Flash abgelegt und über Display und Weboberfläche sichtbar gemacht. Drei Grundregeln erklären fast jedes Verhalten; alle späteren Details sind Ausprägungen davon.

Tabelle 24 - Grundregeln der Firmware

Nr.	Grundregel
1	**Mit USB-Strom wird nie geschlafen.** Solange das Netzteil steckt, ist das Gerät wach, das WLAN an und alle Messungen laufen im vollen Takt.
2	**Kein Zyklus darf verloren gehen.** Zyklen werden nicht abgefragt, sondern per Hardware-Interrupt gezählt. Auch wenn die Firmware gerade das Display zeichnet oder auf das WLAN wartet, zählt der Interrupt weiter.
3	**Die Schlaftiefe folgt der Interessantheit.** Im Akkubetrieb schläft das Gerät umso tiefer, je länger nichts passiert ist. Sobald etwas passiert (Stoss, Schalter, Transport), schläft es nur noch leicht und hört auf alles.

11.1 Aufbau des Codes

Die Dateien

Der Code besteht aus einem Hauptprogramm und neun eigenen Modulen (Tabelle 25 - Dateien der Firmware). Die Nummer ist die Reihenfolge, in der MCM.ino die Module einbindet. Sie ist zugleich die Schichtung des Codes.

Tabelle 25 - Dateien der Firmware

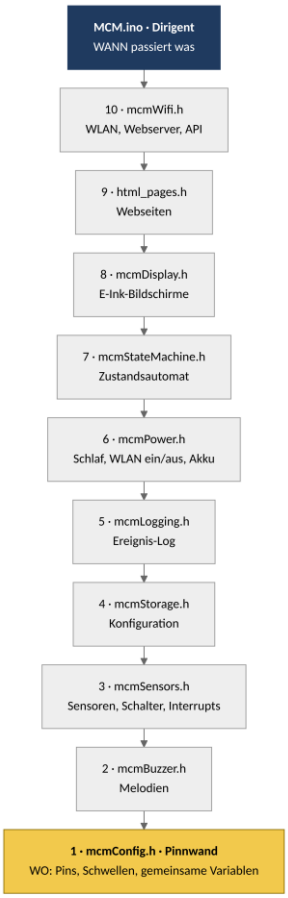
Nr.	Datei	Rolle	Inhalt	Zeilen
-	MCM.ino	Dirigent	setup(), loop(), Aufwach-Entscheidung. Bestimmt Reihenfolge, Bedingungen und Zusammenspiel.	801
1	mcmConfig.h	Pinnwand	Pins, Schwellen, Zeitkonstanten, Hardware-Objekte, Datenstrukturen, alle gemeinsamen Variablen	218
2	mcmBuzzer.h	Werkzeug	Melodien, blockierendes und nicht blockierendes Abspielen	94
3	mcmSensors.h	Werkzeug	LIS2DH, BME280, Schalter, Akku, USB-Erkennung, Interrupt-Routinen	388
4	mcmStorage.h	Werkzeug	Konfiguration laden, speichern, Standardwerte	75
5	mcmLogging.h	Werkzeug	Ereignis-Log als Ringpuffer, Umwandlung in JSON	442
6	mcmPower.h	Werkzeug	WLAN ein/aus, Light Sleep, Deep Sleep, RTC-Speicher, Akkustufen	682
7	mcmStateMachine.h	Werkzeug	Zustandsautomat, Bewegungsauswertung	313
8	mcmDisplay.h	Werkzeug	Alle Bildschirme des E-Ink-Displays	385
9	html_pages.h	Daten	Die fünf Webseiten als Text im Programmspeicher	1979
10	mcmWifi.h	Werkzeug	WLAN-Aufbau, Webserver, alle Adressen der Schnittstelle	571
-	qrcodegen.c/.h	Fremdcode	QR-Code-Erzeugung (Project Nayuki, MIT-Lizenz)	1412

Drei Rollen: wo, wie, wann

Die Aufteilung folgt einer einfachen Arbeitsteilung. Die Pinnwand mcmConfig.h weiss, **wo** etwas hängt, und welche Werte gelten (z.B. der Buzzer an Pin 12). Ein Modul weiss, **wie** etwas gemacht wird (wie eine Melodie abgespielt wird). Der Dirigent MCM.ino weiss, **wann** und unter welchen Bedingungen es passiert (Schock bestätigt, also Schock-Melodie starten). Die Module sind Werkzeuge; sie wissen nicht, wann sie aufgerufen werden. Der Dirigent ist die eine Stelle, an der man den gesamten Ablauf überblickt.

Schichtenregel

Ein Modul darf nur Funktionen aus Modulen verwenden, die vor ihm eingebunden wurden (Abbildung 60). Der Dirigent wird zuletzt übersetzt und darf alles verwenden. Die Regel hat eine praktische Folge, die man am Display gut sieht: Der Zustandsautomat (7) liegt unter dem Display (8) und darf deshalb keine Display-Funktion aufrufen. Er meldet nur den neuen Zustand. Der Dirigent vergleicht den Zustand vor und nach dem Aufruf und zeichnet das Display selbst nach. Dasselbe Muster gilt für den Schlaf: mcmPower.h schläft nur und meldet den Weckgrund; was daraus folgt, entscheidet der Dirigent. Die Abhängigkeiten im Code wurden geprüft, die Regel ist nirgends verletzt.



Lesart: Jeder Pfeil bedeutet «darf verwenden». Ein Modul darf alles verwenden, was unter ihm liegt, aber nichts, was über ihm liegt.

Beispiele aus dem Code: Logging (5) verwendet den Buzzer (2), um eine Melodie während des Schreibens am Leben zu halten, und die Sensoren (3), um Klimawerte zu lesen. Power (6) verwendet Storage (4), um vor dem Schlaf die Konfiguration zu sichern, und Logging (5), um Strom-Ereignisse zu schreiben. Der Zustandsautomat (7) verwendet Logging (5) für den Zustandswechsel und Power (6), um das WLAN je Zustand zu schalten. Wifi (10) darf alles darunter, weil die Webseiten alles anzeigen.

Was nicht erlaubt ist: Braucht ein Modul etwas aus einer höheren Schicht, gehört diese Logik in den Dirigenten.

Abbildung 62 - Schichtung der Firmware: Einbinde-Reihenfolge als Abhängigkeitsregel (Quelle: Selbst erstellt)

Warum so?
Jede dieser Entscheidungen hat eine Alternative, die im Lehrbuch oder in der Transferarbeit steht. Tabelle 25 begründet die Wahl.

Tabelle 26 - Entscheidungen zum Aufbau und ihre Begründung

Entscheidung	Begründung
Aufteilen statt eine grosse Datei	Mit rund 4'000 Zeilen eigenem Code ohne Webseiten wäre eine einzige Datei nicht mehr überschaubar. Jede Datei hat ein Thema, Fehler lassen sich eingrenzen.
Nur .h-Dateien, keine .cpp	Das System verlangt Paare aus .h (Inhaltsverzeichnis) und .cpp (Inhalt). Das verdoppelt die Dateien und bringt zusätzliche Regeln. Weil nur eine Datei (MCM.ino) jedes Modul genau einmal einbindet, ist das Einbinden reines Einfügen von Text. Der Compiler sieht am Ende denselben Code wie bei einer einzigen Datei, ohne zusätzlichen Speicherverbrauch.
mcmConfig.h als Pinnwand	Die Module können das Hauptprogramm nicht lesen, das Einbinden geht nur in eine Richtung. Gemeinsame Werte brauchen deshalb einen Ort, den alle kennen. Jede Datei, die mcmConfig.h einbindet, kann die Variablen dort lesen und schreiben. Ein Pin oder eine Schwelle wird an genau einer Stelle geändert.
Include Guards in jeder Datei	mcmConfig.h wird von jedem Modul eingebunden. Die drei Zeilen #ifndef / #define / #endif sorgen dafür, dass der Inhalt trotzdem nur einmal übersetzt wird.
Feste Einbinde-Reihenfolge	Sie macht die Abhängigkeiten sichtbar und verhindert Kreuz-Abhängigkeiten. Was ein Modul aus einer höheren Schicht bräuchte, gehört in den Dirigenten.

Entscheidung	Begründung
Eine Schleife statt mehrerer Tasks	In der Transferarbeit liefen die Aufgaben als FreeRTOS-Tasks (Hoti, 2026). Zeitkritisch sind im MCM nur Zyklus und Schock, und beide erfasst ein Interrupt. Alles andere darf warten. Aus dem Deep Sleep startet der ESP32 ohnehin neu; ein Ablauf, der bei jedem Aufwachen von vorn beginnt, ist mit einer Schleife einfacher zu überblicken. Weil nur eine Stelle auf Display, Bus und Flash zugreift, braucht es keine Absicherung zwischen Tasks. Der Preis: Ein Neuzeichnen des Displays hält die Schleife an (Teilbild rund 0.5 bis 1 s, Vollbild 2 bis 3 s, nur ungefähr mit Videoaufnahme gemessen). Zyklen gehen dabei nicht verloren, der Interrupt zählt weiter.
Dirigent entscheidet, Module führen aus	Die Frage «wann passiert was» steht an einer Stelle. Prioritäten wie «erst Display, dann Melodie» lassen sich nur dort sauber durchsetzen.

Wie die Module miteinander reden

Module rufen sich nicht kreuz und quer auf. Interrupts und Web-Handler hinterlassen Merkzeichen auf der Pinnwand, und der Dirigent holt sie in seiner Reihenfolge ab (Abbildung 61). Ein Interrupt setzt nur ein Flag und erhöht einen Zähler; er zeichnet nicht, schreibt nicht in den Flash und wartet nicht. Ein Web-Handler antwortet dem Browser sofort und setzt für alles Weitere ein Merkzeichen. So bleibt die Reaktion schnell, und die eigentliche Arbeit geschieht an der vorgesehenen Stelle der Schleife.

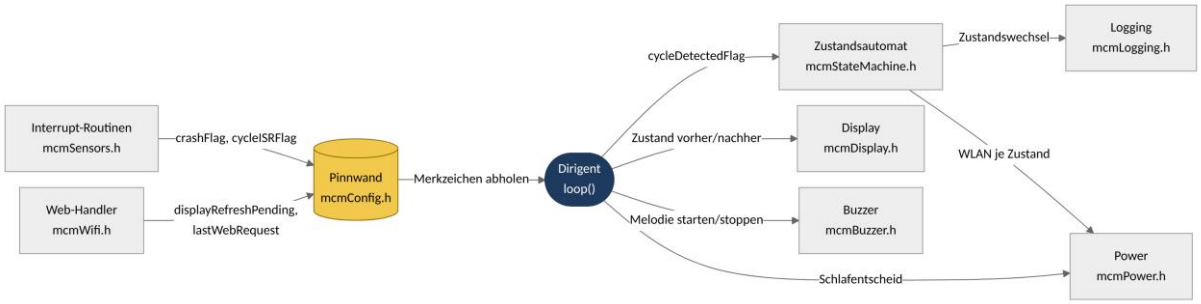


Abbildung 63 - Nachrichtenwege zwischen Interrupts, Web-Handlern, Pinnwand und Dirigent (Quelle: Selbst erstellt)

Die wichtigsten Merkzeichen auf der Pinnwand zeigt die nachfolgende Tabelle,

Tabelle 27 - Die wichtigsten gemeinsamen Variablen in mcmConfig.h

Variable	Wer schreibt	Wer liest	Bedeutung
isrEdgeCount, cycleISRFlag	Zyklus-Interrupt	Dirigent	Neue Schaltflanken am Zyklus-Schalter
crashFlag	Schock-Interrupt	Dirigent	Sensor hat einen Stoss gemeldet, muss bewertet werden
cycleDetectedFlag	Dirigent	Zustandsautomat	Seit der letzten Auswertung kam mindestens ein Zyklus
machineState, stateSince	Zustandsautomat	alle	Aktueller Zustand und Zeitpunkt des letzten Wechsels
cfg	Web-Handler, Dirigent	alle	Konfiguration inklusive Zyklusstand
usbPowered, batteryV, batteryLevel	Power	Dirigent, Display, Logging, Web	Stromversorgung
displayRefreshPending	Web-Handler	Dirigent	Display neu zeichnen, sobald keine Melodie läuft
lastWebRequest	Web-Handler	Dirigent	Jemand schaut gerade zu, nicht einschlafen
watchWindowUntil	Aufwach-Pfad	Dirigent	Wachsamkeitsfenster nach einem Stoss

11.2 Abläufe

Start: Einschalten oder Aufwachen

setup() läuft in zwei Fällen: nach dem Einschalten und nach jedem Aufwachen aus dem Deep Sleep. Aus Sicht des ESP32 ist ein Aufwachen ein Neustart, bei dem nur der RTC-Speicher erhalten bleibt (makeroo.de, o.D.). Die Firmware unterscheidet die Fälle am Aufwachgrund. Der Aufwach-Pfad ist bewusst kurz: Display und WLAN werden erst gestartet, wenn feststeht, dass das Gerät wach bleibt. Ein Timer-Aufwachen im Lager kommt ohne beides aus und kostet entsprechend wenig Akku.

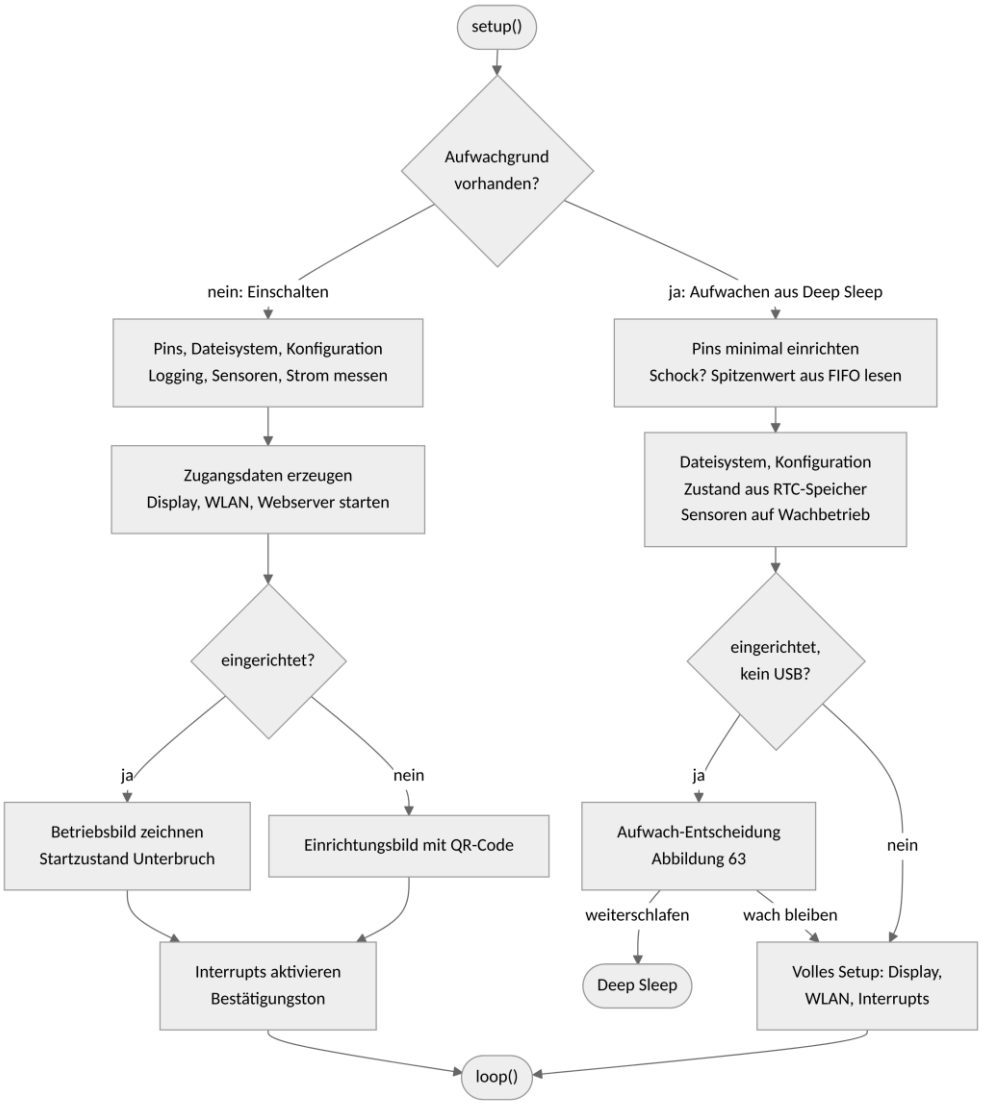


Abbildung 64 - Ablauf von setup(): Einschalten links, Aufwachen aus dem Deep Sleep rechts (Quelle: Selbst erstellt)

Aufwach-Entscheidung im Schlafbetrieb

Für das eingerichtete Gerät ohne USB-Strom entscheidet handleSleepWakeup(), ob es sofort weiterschläft oder wach bleibt. Ein Schock hält immer wach: Wer das Werkzeug anstösst, öffnet vielleicht gleich die Form oder steckt USB an. Ein Timer-Aufwachen misst Klima und Akku, prüft im Transport die Bewegung und schläft weiter. Eine Bewegung wird 2.5 s lang geprüft; nur anhaltende Bewegung führt in den Transport, ein kurzer Stoss öffnet ein Wachsamkeitsfenster von 15 Minuten.

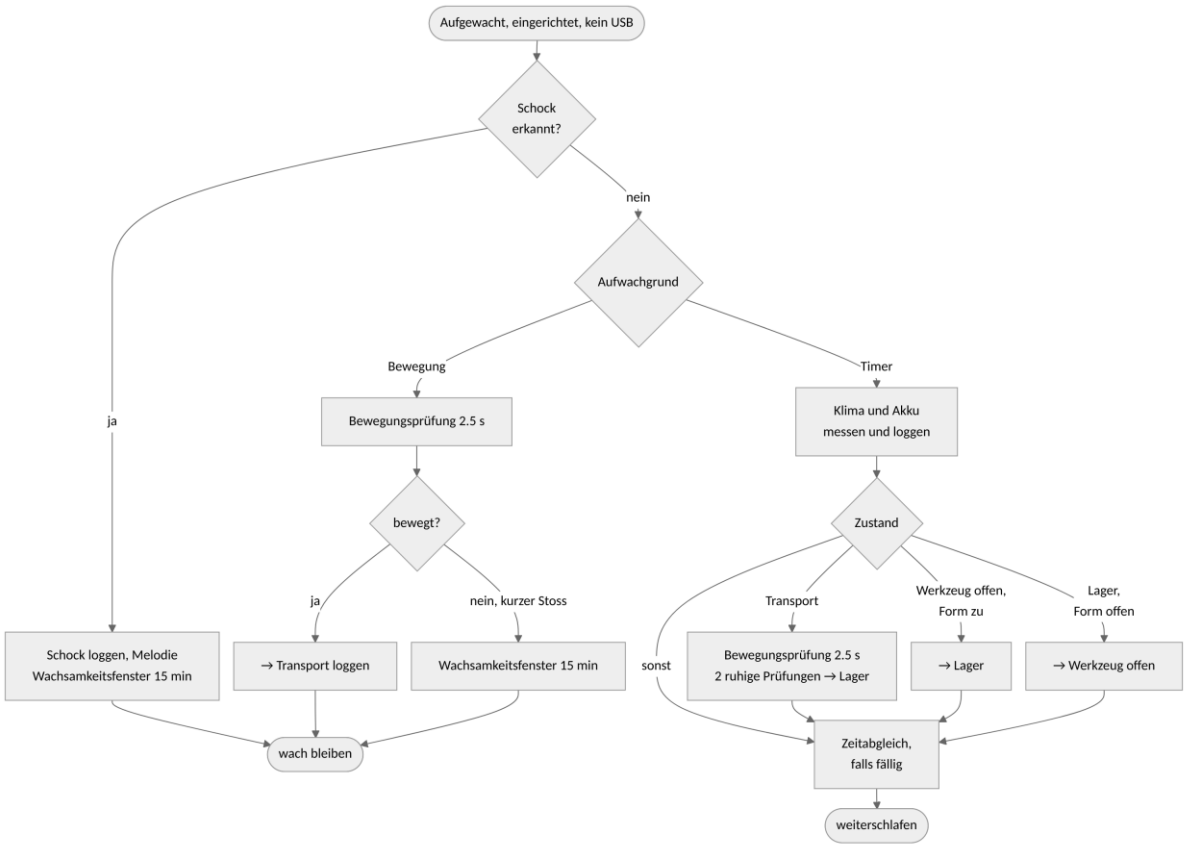


Abbildung 65 - Aufwach-Entscheidung: weiterschlafen oder wach bleiben (Quelle: Selbst erstellt)

Die Hauptschleife

loop() läuft im Wachbetrieb ohne feste Taktung so schnell wie möglich durch. Jeder Durchlauf arbeitet dieselben 21 Schritte in derselben Reihenfolge ab, gegliedert in fünf Gruppen (Abbildung 64). Die meisten Schritte haben einen eigenen Zeitzähler und tun nur dann etwas, wenn ihr Intervall abgelaufen ist. Tabelle 27 listet die Schritte mit ihrem Takt.



Abbildung 66 - Die fünf Gruppen eines Schleifendurchlaufs (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 28 - Die 21 Schritte der Hauptschleife

Nr.	Gruppe	Schritt	Takt
1	Immer	Hintergrund-Melodie Ton für Ton weiterführen	jeder Durchlauf
2		Aufgeschobenes Neuzeichnen des Displays, wenn keine Melodie läuft	jeder Durchlauf
3		Netzwerk bedienen (DNS, Webserver), wenn WLAN an	jeder Durchlauf
4	Überwachung, nur eingerichtet	Schock-Merkzeichen bewerten (Kapitel 11.3)	sofort
5		Zyklus-Merkzeichen abholen, Zähler nachführen, Display alle 10 Zyklen	sofort
6		Schalter einlesen	alle 10 ms
7		Zustandsautomat auswerten, bei Wechsel Display nachführen	alle 100 ms
8		Klima und Akku ins Log schreiben	alle 10 min

Nr.	Gruppe	Schritt	Takt
9	Strom und Sichern	USB und Akku messen, Stufe bestimmen, Warnung «Kein Strom»	jede Sekunde
10		Konfiguration, Log-Index und RTC-Speicher sichern	alle 10 min
11		WLAN neu verbinden, falls getrennt (nur WLAN-Modus)	alle 30 min, max. 10 s
12	Schlafentscheid, nur Akkubetrieb	Bewegung für den Schlafentscheid prüfen	jede Sekunde
13		Wachsamkeitsfenster abgelaufen?	jeder Durchlauf
14		Lager: 10 s ruhig, dann Deep Sleep	jeder Durchlauf
15		Akku kritisch: sofort Deep Sleep	jeder Durchlauf
16		Werkzeug offen: 10 min Leerlauf, dann Deep Sleep	jeder Durchlauf
17		Unterbruch: 10 min Leerlauf ohne USB, dann Lager	jeder Durchlauf
18		Light Sleep, eine Scheibe von 60 s	wenn erlaubt
19	Bedienung	Nicht eingerichtet: 10 min ohne Client und ohne USB, dann Deep Sleep 24 h	jeder Durchlauf
20		PIN-Anzeige auf dem Display nach 2 min löschen	jeder Durchlauf
21		Reset-Taster abfragen (3 bis 8 s: Warnton, ab 8 s: Werksreset)	alle 100 ms

Zwei Ordnungsregeln gelten in der ganzen Schleife.

Display vor Melodie: Ein Neuzeichnen blockiert die Schleife. Vor jedem Neuzeichnen wird deshalb eine laufende Melodie gestoppt, damit kein Ton hängen bleibt; Melodien starten erst danach.

Web-Handler zeichnen nicht selbst: Sie setzen nur displayRefreshPending. Der Dirigent zeichnet im nächsten Durchlauf, sobald keine Melodie läuft. So bekommt der Browser seine Antwort sofort.

Feste Zeitgrenzen
Alle Zeitgrenzen sind Konstanten in mcmConfig.h (Tabelle 27). Sie sind nicht über die Weboberfläche einstellbar. Die drei Schwellen für Bewegung, Schock und Taupunkt sind dagegen Teil der Konfiguration und werden auf der Seite «Grenzwerte» gesetzt (Kapitel 9.2).

Tabelle 29 - Feste Zeitgrenzen der Firmware

Grenze	Wert	Wirkung
Prellsperre Zyklus-Schalter	30 ms	Flanken in kürzerem Abstand zählen nicht
Schock-Entprellung	2 s	Mehrere Bestätigungen in dieser Zeit sind ein Ereignis
Schonfrist nach «Form zu»	3 s	Zyklen zählen nicht für die Produktionserkennung
Transport-Beginn	5 s	Anhaltende Bewegung
Bewegungslücke	2 s	Lücken bis 2 s unterbrechen eine Bewegung nicht; Stösse unter 2 s unterbrechen die Ruhe nicht
Ruhezeit vor Deep Sleep	10 s	Im Lager ohne Bewegung
Wachhalten durch Cockpit	30 s	Nach der letzten Webanfrage
Unterbruch	60 s	Ohne Zyklus in der Produktion
Wachphase Transport, Werkzeug offen	2 min	Danach Light Sleep
Zyklusmuster	5 min	3 Zyklen in diesem Fenster nötig
Stillstand	10 min	Transport-Ende, Unterbruch zu Lager, Werkzeug offen zu Deep Sleep
Wachsamkeitsfenster	15 min	Light Sleep statt Deep Sleep nach einem Stoss

11.3 Erfassung

Kapitel 8.4.2 legt fest, welche Grösse periodisch und welche per Interrupt erfasst wird. Die folgenden Abschnitte zeigen für jede Grösse den Weg vom Rohsignal zum Ereignis.

Zykluszählung (F04)

Ein Zyklus ist einmal Form auf und einmal Form zu. Gezählt wird am Slot, dem die Funktion «Formtrennung / Zyklus» zugewiesen ist. Abbildung 65 zeigt den Weg einer Schaltflanke bis zum Display.

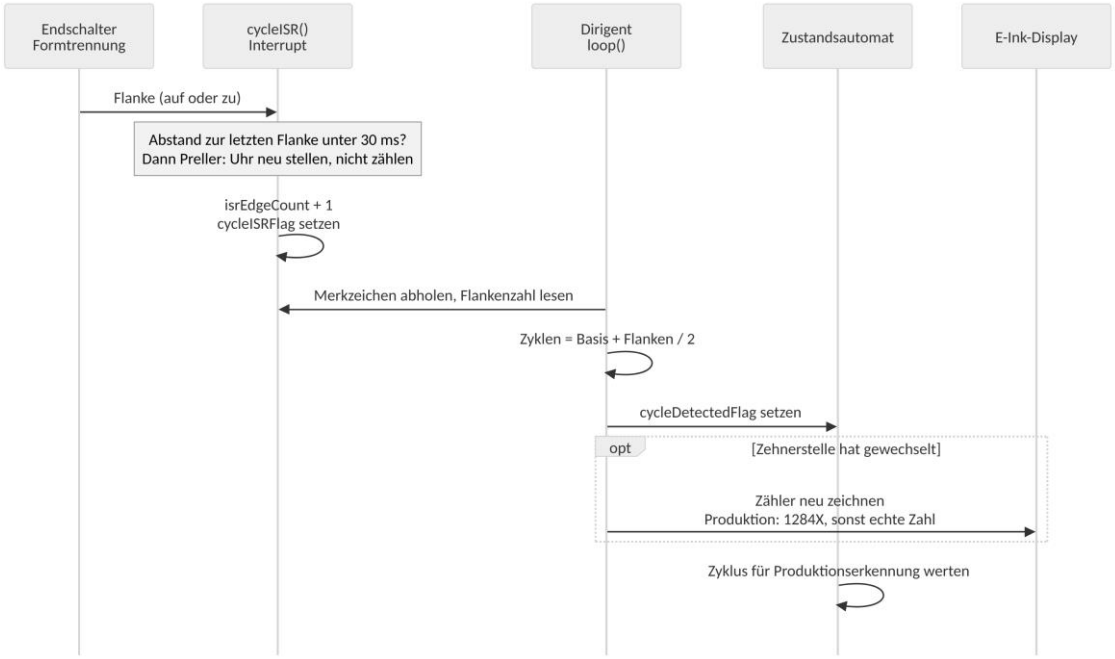


Abbildung 67 - Zykluszählung vom Endschalter bis zum Display (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 30 - Eigenschaften der Zykluszählung

Eigenschaft	Umsetzung
Interruptgestützte Zählung	Der Interrupt zählt unabhängig davon, was die Schleife gerade tut (Display, WLAN, I2C).
Prellfest	Jede Flanke stellt die Prell-Uhr neu. Ein Prellpaket verlängert so seine eigene Sperre. Gezählt wird nur eine Flanke, vor der mindestens 30 ms Ruhe war.
Beide Flanken	Der Interrupt reagiert auf jede Änderung. Zwei gezählte Flanken ergeben einen Zyklus. Die Einstellung «Beim Schalten / Beim Loslassen» hat auf die Zählung keinen Einfluss.
Basis plus Flanken	cycle_count = Basis + Flanken / 2. Nach jeder äusseren Änderung des Zählerstands (Start, Aufwachen, Speichern in der Weboberfläche) wird die Basis neu gesetzt und der Flankenzähler genullt.
Anzeige	Das Display wird nur alle 10 Zyklen aktualisiert, weil jedes Neuzeichnen die Schleife blockiert. In der Produktion steht statt der Einerstelle ein X (Kapitel 9.3).
Im Light Sleep	Jede Pegeländerung am Schalter weckt das Gerät. Die Weckflanke wird von Hand nachgebucht, weil der Interrupt während des Schlafs abgehängt ist.
Im Deep Sleep	Schalter wecken nicht. Zyklen im Deep Sleep werden nicht gezählt (Kapitel 11.8).
Sicherung	Der Zählerstand liegt im RAM, wird alle 10 min und vor jedem Schlaf in config.bin geschrieben und vor dem Deep Sleep zusätzlich im RTC-Speicher gehalten.

Produktionserkennung. Ein einzelner Schaltimpuls (Testschuss, Form von Hand schliessen) soll keine Produktion auslösen. Der Automat verlangt deshalb ein wiederholbares Muster: drei Zyklen innerhalb von fünf Minuten, gezählt ab dem ersten. In der Produktion stellt jeder Zyklus die 60-s-Uhr neu. Die Schonfrist von 3 s nach dem Übergang «Werkzeug offen zu Lager» fängt die Schaltflanke ab, die beim Schliessen des Werkzeugs

von Hand entsteht. Sie betrifft nur die Wertung; der Zykluszähler zählt jede zweite Flanke unabhängig vom Zustand.

Die feste Unterbruchgrenze von 60 s ist für Werkzeuge geeignet, deren reguläre Zykluszeiten unterhalb dieser Grenze liegen. Bei langsameren Werkzeugen kann der Zustandsautomat einen normal laufenden Prozess als Unterbruch klassifizieren. Diese Einschränkung ist unabhängig von der interruptgesteuerten Zykluszählung und wird in der nächsten Firmwareversion über einen einstellbaren Grenzwert behandelt (Kapitel 11.8, Nr. 7).

Bewegung
Bewegung wird je nach Situation auf vier Arten geprüft (Tabelle 31). Alle verwenden dieselbe Schwelle motion_th (Standard 0.08 g, einstellbar) und dieselbe Ruhelage accelBaseline (Betrag in Ruhe, Standard 1.0 g, auf der Seite «Grenzwerte» neu erfassbar als Mittel aus 50 Messungen).

Tabelle 31 - Vier Arten der Bewegungsprüfung

Art	Wann	Wie	Dauer
Software-Messung	Wachbetrieb, alle 100 ms im Zustandsautomaten	5 Messwerte im Abstand von 2.5 ms. Grösste Abweichung des Betrags von der Ruhelage über der Schwelle	10 bis 15 ms
Schlafentscheid	Wachbetrieb im Akkubetrieb, jede Sekunde	Dieselbe Messung, gedrosselt und zwischengespeichert	10 bis 15 ms
Hardware-Wecker	Light und Deep Sleep, ausser im Transport	Der Sensor vergleicht selbst: hochpassgefiltert, ohne Erdanziehung, über der Schwelle für 2 Messwerte. INT2 weckt den ESP32.	dauernd, ohne ESP32
Messfenster	Direkt nach dem Aufwachen	Über 2.5 s wiederholt messen. «Bewegt», wenn mindestens 3 Treffer, oder eine Achse um mehr als 0.06 g schwankt, oder die Lage um mehr als 5° von der letzten Prüfung abweicht (rollendes Schiff)	2.5 s

Aus der Einzelmessung entstehen die beiden Signale des Zustandsautomaten:

Anhaltende Bewegung liegt vor, wenn Bewegung seit mindestens 5 s besteht; Lücken bis 2 s gelten nicht als Ende.

Anhaltende Ruhe liegt vor, wenn seit 10 min keine Bewegungsphase von 2 s oder länger kam; einzelne kurze Stösse setzen die Ruhe-Uhr nicht zurück.
Warum Bewegung im Transport nicht weckt: Dauervibration ist dort der Normalfall und keine neue Information. Sonst würde jede Welle und jedes Schlagloch das Gerät wecken.

Schock (F02)
Ein Schock ist ein Stoss, dessen Spitzenwert die Schwelle crash_th erreicht. Die Erkennung ist zweistufig und je nach Wachheit verschieden (Abbildung 68). Im Wachbetrieb meldet der Sensor jeden Stoss über 0.5 g; die Firmware liest sofort fünf Messwerte und entscheidet selbst. Im Deep Sleep kann die Firmware nicht nachmessen. Der Sensor wird deshalb vor dem Einschlafen umgestellt: Er vergleicht selbst mit der Schwelle, misst bis ±8 g mit 400 Hz und hält beim Schlag seine letzten 32 Messwerte im FIFO fest. Der ESP32 wacht auf und liest den Spitzenwert aus. Der Standardwert in der Firmware ist 1.5 g.

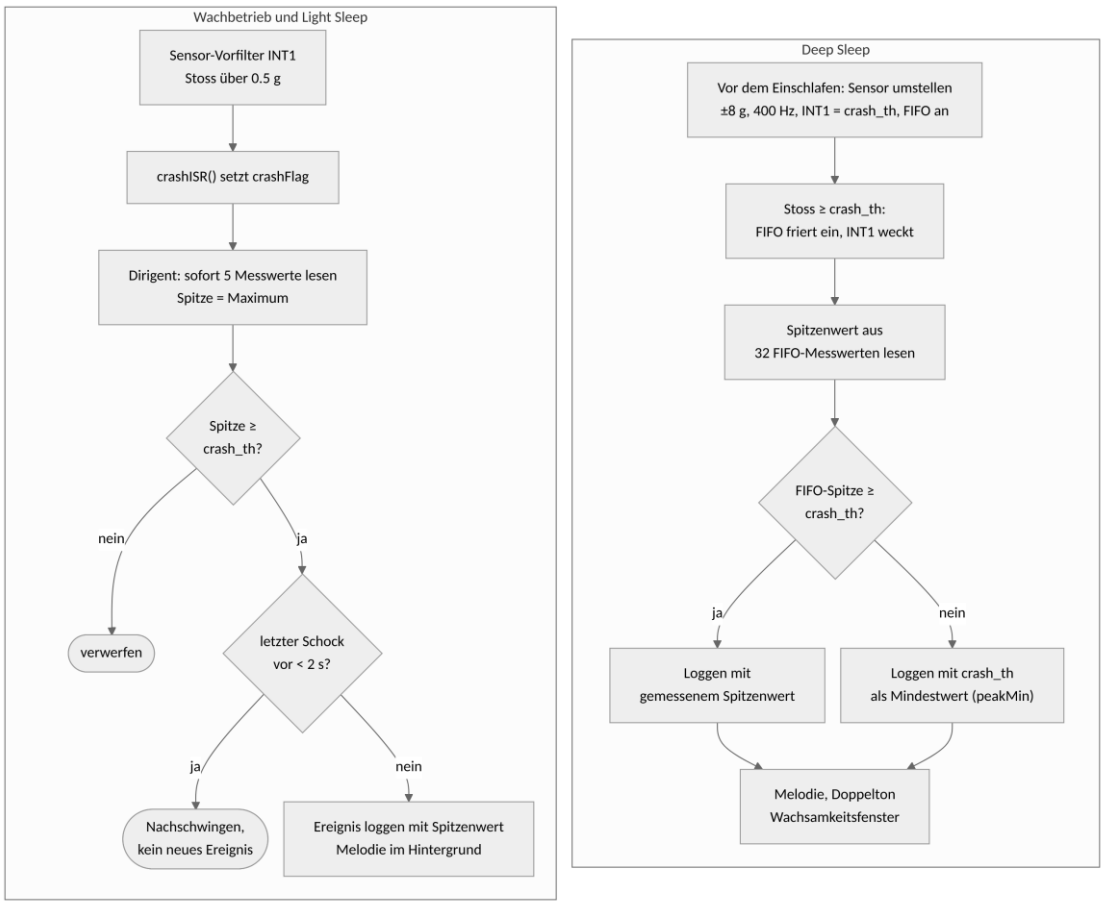


Abbildung 68 - Schockerkennung im Wachbetrieb und im Deep Sleep (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 32 - Schockerkennung im Vergleich

	Wachbetrieb und Light Sleep	**Deep Sleep**
Wer entscheidet	Firmware, nach Vorfilter des Sensors	Sensor selbst
Vergleichswert	Betrag inklusive Erdanziehung ≥ crash_th	Stoss ohne Erdanziehung ≥ crash_th
Messbereich	±2 g, 1 mg pro Schritt (für feine Bewegungserkennung)	±8 g, 4 mg pro Schritt
Abtastrate	100 Hz	400 Hz, damit kurze Spitzen nicht zwischen zwei Messwerte fallen
Spitzenwert im Log	gemessen; bei Sättigung eine Untergrenze	aus dem FIFO, sonst crash_th als Mindestwert (peakMin)
Mehrfachauslösung	2 s Entprellung	Folgeschläge im Wachsamkeitsfenster
Quittung	Schock-Melodie	Schock-Melodie und Doppelton

Sturz aus dem Tiefschlaf. Bei einem Sturz weckt zuerst der freie Fall über den Bewegungs-Wecker. Der Aufprall kommt 0.3 bis 1 s später, mitten im Startvorgang. Deshalb lauscht die Firmware nach einer Bewegungs-Weckung bis zu 1.5 s auf den Schock-Pin, bevor sie den Sensor zurückstellt.

Die beiden Betriebsarten verwenden unterschiedliche physikalische Auswertewerte. Im Wachbetrieb wird der Betrag der Beschleunigung einschliesslich Gravitation mit crash_th verglichen und der Messbereich kann bei ±2 g sättigen. Im Deep Sleep erfolgt die Auslösung über den Sensor mit anderer Filterung und ±8-g-Bereich. Ereignisanzahl und protokollierte Spitzenwerte sind deshalb zwischen den Modi nur eingeschränkt vergleichbar. Ein gespeichertes peakMin-Kennzeichen signalisiert, dass lediglich eine Mindestabschätzung und keine frei aufgelöste Spitze vorliegt.

Klima und Taupunkt (F03)
Der BME280 arbeitet im Einzelmess-Modus: Er misst nur, wenn die Firmware es verlangt, höchstens alle 30 s, und schläft sonst. Bei jeder Messung berechnet die Firmware den Taupunkt nach der Magnus-Formel (Kapitel 6.4.1) und den Abstand ΔT = Temperatur − Taupunkt. Liegt ΔT unter dew_th (Standard 3 °C, Kapitel 6.4.2), erhält der Eintrag das Kennzeichen Kondensationsrisiko. Ein Signalton ertönt nicht; sichtbar wird das Risiko auf der Zeitachse des Cockpits. Liegt ΔT unter 5 °C, misst das Gerät im Deep Sleep wieder alle 10 min statt alle 30 oder 60 (Kapitel 11.5). Jeder Klima-Eintrag enthält zusätzlich Akkuspannung und Stromquelle, so dass der Akkuverlauf aus demselben Log lesbar ist.

Der Vergleich gilt für die Luft im Gehäuse. Die Temperaturmessung im Gehäuse kann durch Eigenerwärmung von Elektronik und WLAN höher liegen als die Umgebungsluft. Ein Vergleich zweier BME280-Messstellen nach 30 Minuten ergab eine Temperaturdifferenz von rund 5.0 °C. Erwärmt sich Luft bei nahezu konstantem Wasserdampfgehalt, sinkt zwar ihre relative Feuchte, der berechnete Taupunkt bleibt näherungsweise gleich. Der vom Prototyp verwendete Abstand ΔT_S = T_S − T_d steigt jedoch etwa um die Temperaturerhöhung. Beispielsweise ergeben 20 °C/85 % rF einen Taupunkt von rund 17.4 °C und ΔT_S ≈ 2.6 °C (Warnung); nach reiner Erwärmung auf 25 °C bei rund 62.7 % rF bleibt T_d ≈ 17.4 °C, der gemessene Abstand steigt aber auf rund 7.6 °C (keine Warnung). Die Eigenerwärmung beeinträchtigt somit vor allem die Zuverlässigkeit des 3-°C-Risikokriteriums, nicht zwangsläufig die Taupunktberechnung selbst. Die tatsächliche Werkzeugkondensation kann ohne Stahltemperatur nicht beurteilt werden (Kapitel 6.4.2).6.4.2

Stromversorgung
Die USB-Erkennung kommt ohne zusätzliche Hardware aus: Der USB-Seriell-Wandler auf dem FireBeetle hängt nur an der USB-Versorgung und hält seine Sendeleitung HIGH, solange USB Strom liefert. Diese Leitung liegt an GPIO3; ohne USB zieht ein Pull-down den Pin auf LOW. Die Akkuspannung wird über den Spannungsteiler an GPIO34 als Mittel aus 16 Messungen gelesen und im Wachbetrieb gleitend geglättet, weil das WLAN kurze Lastspitzen erzeugt. Daraus folgt eine von drei Akkustufen mit Hysterese:
ok (über 3.60 V), **tief** (unter 3.50 V, Anzeige im Cockpit, kein Zeitabgleich mehr) und **kritisch** (unter 3.35 V, Minimalbetrieb: sofort Deep Sleep, Messintervall fest 60 min).

Läuft die Produktion ohne USB, schreibt die Firmware einmal ein Ereignis, zeigt das Banner «KEIN STROM» und spielt höchstens einmal pro Minute einen Warnton (W06).

11.4 Zustandsautomat

Der Zustandsautomat (updateStateMachine() in mcmStateMachine.h) wird alle 100 ms ausgewertet und kennt genau sechs Eingangssignale (Tabelle 33). Er läuft nur im eingerichteten Gerät. Im nicht eingerichteten Gerät werden Zyklen nicht ausgewertet und weder Schocks noch Klima geloggt.

Tabelle 33 - Eingangssignale des Zustandsautomaten

Signal	Definition
motion	Jetzt gerade Bewegung: Abweichung von der Ruhelage über motion_th in einer der 5 Messungen
sustainedMotion	Bewegung besteht seit mindestens 5 s, Lücken bis 2 s zählen nicht als Ende
sustainedStill	Seit 10 min keine Bewegungsphase von 2 s oder länger
formOpen	Der Schalter «Formtrennung / Zyklus» ist aktiv. Ist kein Slot so belegt, gilt die Form immer als geschlossen.
cycleValid	Seit der letzten Auswertung mindestens ein Zyklus, und die Schonfrist nach «Form zu» ist vorbei
productionConfirmed	Dritte cycleValid-Meldung innerhalb von 5 min seit der ersten. Wird nur ausserhalb der Produktion gezählt.

Abbildung 69 zeigt die Übergänge im Wachbetrieb. Die vier Zustände ohne Produktion stehen in einem gemeinsamen Rahmen. Ein Pfeil, der am Rahmen beginnt, gilt für alle vier; ein Pfeil, der am Rahmen endet, führt zum Eintrittspunkt Unterbruch. Die Kennungen T1 bis T13 verweisen auf Tabelle 34.

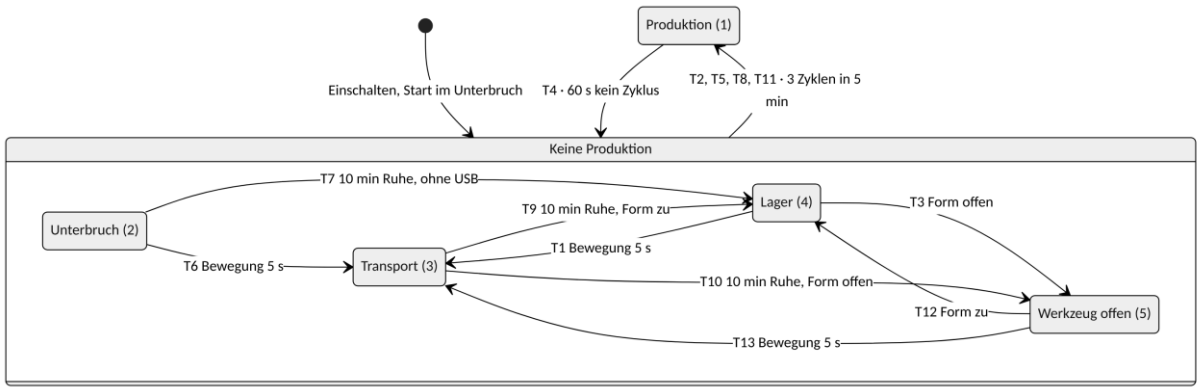


Abbildung 69 - Zustandsautomat der Firmware mit Übergängen T1 bis T13 (Quelle: Selbst erstellt)

In die Produktion führt immer nur ein Zyklusmuster, nie ein einzelner Schaltimpuls. Aus der Produktion führt nur ein Weg: 60 s ohne Zyklus. Bewegung und Formstellung werden in der Produktion nicht ausgewertet, weil eine laufende Maschine vibriert und die Form bei jedem Zyklus öffnet. Transport beginnt mit 5 s anhaltender Bewegung und endet nach 10 min Ruhe; je nach Formstellung landet das Werkzeug im Lager oder im Zustand «Werkzeug offen». Diese beiden unterscheiden sich nur durch den Schalter und wechseln sofort. Innerhalb eines Zustands werden die Bedingungen in der Reihenfolge der Priorität geprüft; die erste zutreffende gewinnt.

Tabelle 34 - Übergangstabelle des Zustandsautomaten

Nr.	Von	Nach	Bedingung	Prio	Besonderheit
T1	Lager	Transport	sustainedMotion	1	
T2	Lager	Produktion	productionConfirmed	2	
T3	Lager	Werkzeug offen	formOpen	3	
T4	Produktion	Unterbruch	seit über 60 s kein gültiger Zyklus	1	einziger Ausgang
T5	Unterbruch	Produktion	productionConfirmed	1	
T6	Unterbruch	Transport	sustainedMotion	2	
T7	Unterbruch	Lager	kein USB, keine Bewegung, über 10 min kein Zyklus, Lage hält 10 s an	-	im Dirigenten geprüft
T8	Transport	Produktion	productionConfirmed und im selben Moment keine Bewegung	1	
T9	Transport	Lager	sustainedStill und Form zu	2	rückdatiert
T10	Transport	Werkzeug offen	sustainedStill und Form offen	3	
T11	Werkzeug offen	Produktion	productionConfirmed	1	
T12	Werkzeug offen	Lager	Form zu	2	Schonfrist 3 s
T13	Werkzeug offen	Transport	sustainedMotion	3	

Rückdatierung. Das Ende eines Transports wird erst 10 min nach der letzten Bewegung festgestellt. Der Zeitstempel des Eintrags wird deshalb auf die letzte erkannte Bewegung zurückdatiert. So stimmt die Dauer des Transports in der Auswertung.

Was bei jedem Wechsel passiert
Jeder Wechsel im Wachbetrieb läuft über changeState() und führt immer dieselben Schritte aus: Sonderfälle behandeln (nach «Form zu» die Schonfrist starten, beim Eintritt in die Produktion den Musterzähler nullen, beim Betreten oder Verlassen der Produktion eine laufende Melodie stoppen), das Ereignis mit neuem Zustand, Zyklusstand und Zeitstempel ins Log schreiben, Zustand und Zeitpunkt setzen, Bewegungs- und Ruhe-Uhr nullen und das WLAN für den neuen Zustand schalten (alle ausser Lager: einschalten, falls aus). Zurück im Dirigenten wird das Display nachgeführt. Beim Einschalten startet das Gerät im Unterbruch, nicht im Lager: Lager würde sofort einen Schlafversuch auslösen. Unterbruch ist neutral, und der Automat findet von dort selbst in den richtigen Zustand. Nach dem Aufwachen aus dem Deep Sleep gilt der Zustand vor dem Einschlafen aus dem RTC-Speicher.

Verhalten je Zustand
Mit USB-Strom verhält sich das Gerät in allen Zuständen gleich: dauernd wach, WLAN an, Zustandsautomat alle 100 ms, Klima-Log alle 10 min, kein Schlaf. Im Akkubetrieb hängt das Verhalten vom Zustand ab (Tabelle 35). Ein offenes Cockpit hält das Gerät in jedem Zustand wach, bis 30 s nach der letzten Abfrage.

Tabelle 35 - Verhalten je Zustand im Akkubetrieb

	Produktion	**Unterbruch**	**Transport**	**Lager**	**Werkzeug offen**
Wachheit	dauernd wach	dauernd wach	2 min wach, dann Light Sleep	nach 10 s Ruhe Deep Sleep	2 min wach, dann Light Sleep; nach 10 min Deep Sleep
WLAN	an	an	an in der Wachphase	aus im Schlaf	an in der Wachphase
Zyklen zählen	ja	ja	ja, Schalter weckt	Light Sleep ja, Deep Sleep nein	wie Lager
Schock	ja	ja	ja, Sensor weckt	ja, Sensor weckt	ja, Sensor weckt
Bewegung weckt	-	-	nein	ja	ja
Klima-Log	alle 10 min	alle 10 min	alle 10 min	10 / 30 / 60 min	wie Lager
Besonderes	Warnung «Kein Strom»	nach 10 min Ruhe zu Lager (T7)	endet nach 10 min Ruhe		

11.5 Energieverwaltung

Das Konzept aus Kapitel 8.8 ist mit drei Wachheitsstufen umgesetzt (Abbildung 68). Im Light Sleep pausiert der ESP32 in Scheiben von 60 s; das WLAN ist aus, aber Sensor und Schalter können sofort wecken, und nach dem Wecken läuft die Schleife genau dort weiter, der RAM bleibt erhalten. Im Deep Sleep ist der ESP32 aus bis auf die Echtzeituhr; der Beschleunigungssensor wacht allein, und Aufwachen ist ein Neustart. Die Stromwerte stammen aus Code-Kommentaren und sind nicht gemessen.

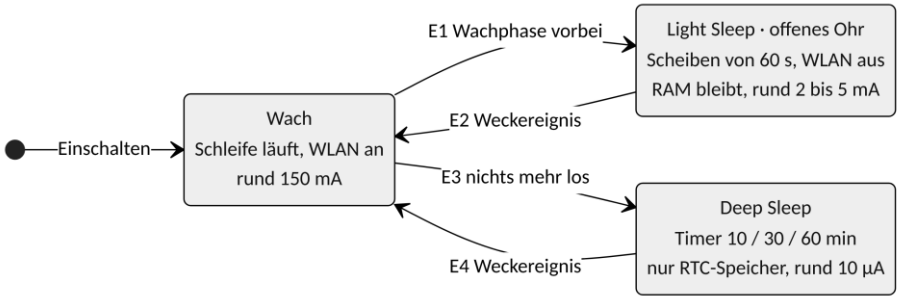


Abbildung 70 - Drei Wachheitsstufen und ihre Übergänge (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 36 - Übergänge zwischen den Wachheitsstufen

Nr.	Übergang	Bedingung
E1	Wach zu Light Sleep	Schlafen erlaubt und eines von: Transport seit 2 min · Werkzeug offen seit 2 min ohne Zyklus · Lager mit offenem Wachsamkeitsfenster
E2	Light Sleep zu Wach	Weckereignis. Das Gerät bleibt mindestens 5 s wach und verarbeitet das Ereignis mit der normalen Logik. Bei USB: voller Wachbetrieb mit WLAN und Display.
E3	Wach zu Deep Sleep	Schlafen erlaubt und eines von: Lager, Fenster zu, 10 s ohne Bewegung · Werkzeug offen, 10 min ohne Zyklus und Bewegung · Akku kritisch in Lager, Transport oder Werkzeug offen · nicht eingerichtet, 10 min ohne Client und USB
E4	Deep Sleep zu Wach	Aufwach-Entscheidung nach Abbildung 63: Schock, anhaltende Bewegung, kurzer Stoss, oder beim Aufwachen wird USB erkannt

Schlafen ist nur erlaubt, wenn vier Bedingungen zugleich erfüllt sind (canSleepNow()): eingerichtet, kein USB, keine Webanfrage in den letzten 30 s, keine laufende Melodie. Für den Light Sleep kommen dazu: kein ausstehendes Neuzeichnen des Displays und die Mindest-Wachzeit nach dem letzten Wecken ist abgelaufen.

Wer weckt wann

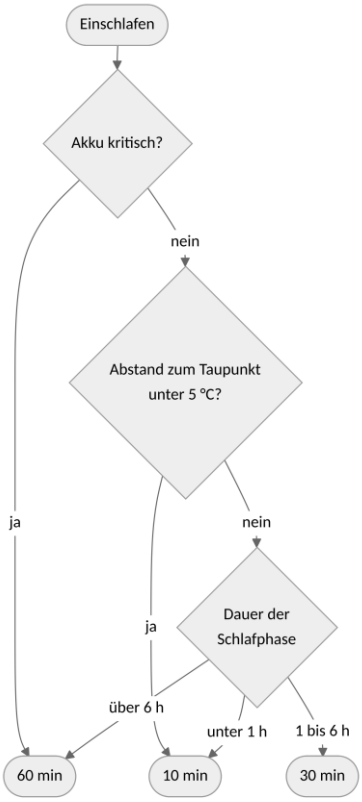
Im Deep Sleep können nur bestimmte Pins des ESP32 wecken. Die Firmware nutzt dort die beiden Sensor-Leitungen INT1 und INT2. Im Light Sleep kann jeder Pin wecken. Dafür stellt die Firmware vor jeder Scheibe für jeden belegten Schalter den Wecker auf den Gegenpegel des aktuellen Zustands, so weckt jede Änderung in beide Richtungen.

Tabelle 37 - Weckquellen je Schlafart

Weckquelle	Light Sleep	Deep Sleep in Lager, Werkzeug offen	Deep Sleep im Transport (nur Akku kritisch)
Schock (INT1, GPIO39)	ja, ab 0.5 g Vorfilter	ja, ab crash_th	ja, ab crash_th
Bewegung (INT2, GPIO36)	ja, ausser im Transport	ja	nein
Schalter-Slots	ja, jede Pegeländerung	nein	nein
USB angesteckt (GPIO3)	ja	nein	nein
Timer	60 s	10 / 30 / 60 min	60 min

Messintervall im Deep Sleep

Vor jedem Einschlafen berechnet nextSleepInterval(), wann der Timer das nächste Mal weckt (Abbildung 71). Die Idee: Je länger nichts passiert ist, desto seltener wird gemessen. Nach dem Einlagern gleicht sich das Werkzeug der Umgebung an, danach ändert sich das Klima langsam, und jedes Aufwachen kostet Akku. Nähert sich die Temperatur dem Taupunkt, wird wieder dichter gemessen. Eine Schlafphase beginnt jedes Mal neu, wenn das Gerät aus dem Wachbetrieb einschläft; ein Timer-Aufwachen setzt sie nicht zurück.



Wachsamkeitsfenster. Wird das Gerät im Lager durch einen Stoss oder Schock geweckt, schläft es nicht sofort wieder tief ein. Wer das Werkzeug berührt, öffnet vielleicht gleich die Form, steckt USB an, oder es folgen weitere Schläge. Das Gerät bleibt 1 min voll wach mit WLAN, danach im Light Sleep mit offenem Ohr. 15 min nach dem Aufwachen wartet es 10 s Ruhe ab und beginnt eine neue Schlafphase.

Zeitabgleich. Die Uhr des ESP32 läuft im Deep Sleep weiter, driftet aber. Im WLAN-Modus holt das Gerät bei einem Timer-Aufwachen einmal pro Tag die Zeit vom Zeitserver: WLAN höchstens 10 s an, bis 10 s warten, WLAN aus. Schlägt es fehl, verdoppelt sich der Abstand auf höchstens 4 Tage, etwa auf See. Bei Akkustufe «tief» entfällt der Abgleich.

Abbildung 71 - Wahl des Messintervalls vor jedem Deep Sleep (Quelle: Selbst erstellt)

11.6 Speicher

Das Konzept aus Kapitel 8.7 ist unverändert umgesetzt. Das Gerät verwendet vier Speicherorte mit unterschiedlicher Lebensdauer (Abbildung 72). Tabelle 38 zeigt, welche Information welchen Fall überlebt.

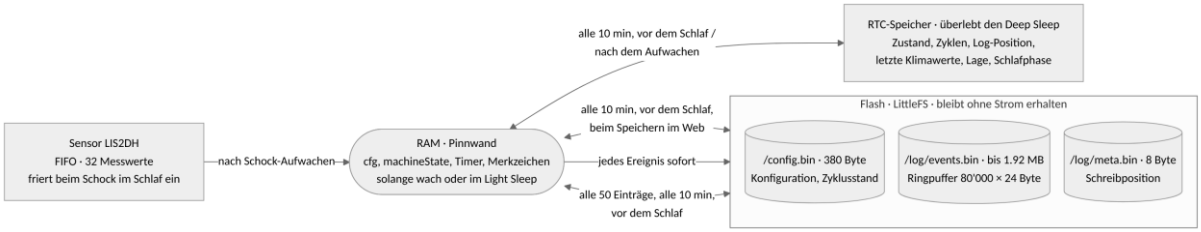


Abbildung 72 - Speicherorte und Sicherungszeitpunkte (Quelle: Selbst erstellt)

Tabelle 38 - Was überlebt was

Information	Light Sleep	Deep Sleep	Stromausfall, Einschalten	Werksreset
Konfiguration	ja	ja	ja	gelöscht
Zyklusstand	ja	ja	Stand der letzten Sicherung, höchstens 10 min alt	auf 0
Ereignis-Log	ja	ja	ja, bis zur letzten gesicherten Schreibposition	bleibt
Werkzeugzustand	ja	ja	nein, Start im Unterbruch	nein
Ruhelage accelBaseline	ja	ja	nein, zurück auf 1.0 g	nein
Uhrzeit	ja	ja	nein, bis zum nächsten Abgleich	nicht betroffen
Timer, Wachsamkeitsfenster	ja	nein	nein	nein

Ringpuffer
Alle Ereignisse landen in einer Datei mit Einträgen fester Länge: 24 Byte, 80'000 Plätze, höchstens 1.92 MB. Die Schreibposition logWriteIndex läuft unbegrenzt hoch. Ist der Puffer voll, überschreibt der neueste Eintrag den ältesten, ohne Eingriff. Beim Schreiben wird die Datei geöffnet, an die Stelle gesprungen, 24 Byte geschrieben, geschlossen. Die Datei wächst mit und wird nicht im Voraus angelegt. Zur Schonung des Flashs wird die Schreibposition nicht bei jedem Eintrag gesichert, sondern nach jedem 50. Eintrag, alle 10 min und vor jedem Schlaf. Rechnerisch ist die Anforderung von 48 Stunden mit Faktor 235 erfüllt (Kapitel 8.7.4).

Tabelle 39 - Aufbau eines Eintrags im Ringpuffer

Byte	Inhalt	Format
0 bis 3	Zeitstempel	Unix-Zeit in Sekunden, 0 = Uhr nicht gestellt
4	Typ	1 Zustandswechsel, 2 Schock, 3 Klima, 4 Konfiguration, 5 Strom
5 bis 23	Nutzdaten	19 Byte, je nach Typ. Zustandswechsel: Zustand, Zyklusstand. Schock: Zyklusstand, Spitzenwert in Hundertstel g, Zustand, Mindestwert-Kennzeichen. Klima: Temperatur, Feuchte, Druck, Taupunkt in Hundertsteln, Kondensations-Kennzeichen, Akkuspannung in mV, Stromquelle. Konfiguration: Art, Zyklusstand vorher und nachher. Strom: Art, Akkuspannung, Zustand.

Die Konfiguration liegt als direktes Abbild der Struktur Config (380 Byte) in config.bin und wird immer als Ganzes geschrieben. Beim Laden wird zuerst alles auf 0 gesetzt; ist die Datei kürzer als die Struktur (ältere Firmware), bekommen neue Felder so sichere Werte. Unplausible Kombinationen führen zurück in die Einrichtung, fehlende Pflichtwerte auf den Standard. Ein von Hand geänderter Zählerstand bleibt nachvollziehbar, weil der Konfigurations-Eintrag im Log den Stand vorher und nachher enthält.

11.7 Schnittstellenspezifikation

Die Datenausgabe ist so beschrieben, dass Dritte ein Backend anbinden können (F06). Das Cockpit nutzt dieselbe Schnittstelle. Die vollständige Spezifikation mit allen Adressen steht im Anhang B. HTTP über WLAN, Port 80; der Client fragt mit GET ab, das Gerät antwortet mit JSON. Die Adresse ist im Standalone-Modus 192.168.4.1, im WLAN-Modus die vom Netzwerk zugewiesene (Kapitel 8.6).

Tabelle 40 - Adressen der Datenausgabe

Adresse	Liefert	Felder
/api/status	Aktueller Stand des Geräts	cycles, state, eq_nr, sgwz_name, crash_count, usb, bat_v, bat_pct
/api/events?from=…&to=…	Ereignisse eines Zeitfensters. from und to in Unix-Zeit. Ohne Angabe: die letzten 24 Stunden.	events (Liste), total (Anzahl)
/api/export	Ganzer Speicherinhalt mit Kopfdaten des Werkzeugs	device, name, exported, cycles, events (Liste), count (Anzahl)

Jeder Eintrag hat die Felder ts und type. ts ist die Zeit in Sekunden seit 1970 (Unix-Zeit, UTC); 0 bedeutet, dass die Uhr nicht gestellt war. Die weiteren Felder hängen vom Typ ab (Tabelle 41).

Tabelle 41 - Felder der Ereignisse

type	Ereignis	Felder
1	Zustandswechsel	state: 1 Produktion, 2 Unterbruch, 3 Transport, 4 Lager, 5 Werkzeug offen. cycles: Zählerstand.
2	Schock	peakG: Spitzenwert in g. state, cycles. peakMin = 1: Der Spitzenwert ist eine Untergrenze.
3	Klima	temp und dew in °C, hum in %, press in hPa. cond = 1: Kondensationsrisiko. bat: Akkuspannung in V. usb = 1: Netzstrom.
4	Konfiguration	sub: 1 Werkzeugdaten, 2 Grenzwerte, 3 Netzwerk, 4 Einrichtung abgeschlossen, 5 Werksreset. cyclesOld und cycles: Zählerstand vorher und nachher.
5	Stromversorgung	sub: 1 USB an, 2 USB ab, 3 Akku tief, 4 Akku kritisch, 5 Produktion ohne Netzstrom, 6 Akku wieder in Ordnung. bat, state.

Beispiel einer Antwort von /api/events mit frei gewählten Werten:

```
{"events":[
  {"ts":1790834400,"type":1,"state":1,"cycles":128417},
  {"ts":1790834700,"type":3,"temp":21.40,"hum":43.00,"press":962.00,"dew":8.30,
   "cond":0,"bat":4.10,"usb":1},
  {"ts":1790835120,"type":2,"cycles":128455,"peakG":1.82,"state":1}
],"total":3}
```

Regeln für die Anbindung. Das Gerät sendet nie selbst. Das Backend fragt in seinem eigenen Takt ab und merkt sich den Zeitstempel des letzten Eintrags. Zustandswechsel und Schocks liefert /api/events immer vollständig, die übrigen Typen höchstens 3'000 pro Abfrage. Vor dem ersten Eintrag steht der letzte Zustandswechsel vor dem Fenster, so ist der Zustand am Anfang bekannt. Erreichbar ist das Gerät nur, wenn es wach ist (Tabelle 34). Die Abfragen sind nicht geschützt: Wer im selben Netzwerk ist, kann lesen. Das Gerät gehört deshalb nicht in ein offenes Netzwerk.

11.8 Bekannte Grenzen

Beim Durcharbeiten des Codes für dieses Kapitel sind Stellen aufgefallen, die man für eine korrekte Beurteilung kennen muss. Keine davon verletzt eine Muss-Anforderung; sie zeigen, wo die Umsetzung Kompromisse eingeht und wo eine nächste Version ansetzen würde (Kapitel 15).

Tabelle 42 - Grenzen der Firmware und ihre Folgen

Nr.	Beobachtung	Folge
1	Im Deep Sleep wecken weder Schalter noch USB. Nur die beiden Sensor-Leitungen sind weckfähig.	Zyklen im Deep Sleep werden nicht gezählt. Ein geöffnetes Werkzeug wird erst beim nächsten Timer bemerkt (bis 60 min). In der Praxis weckt meist die Erschütterung beim Anstecken, Öffnen oder Bewegen.
2	Der Zyklusstand wird nur alle 10 min und vor dem Schlaf in den Flash geschrieben.	Fällt der Strom im Wachbetrieb ganz aus (Akku leer), gehen bis zu 10 min Zyklen verloren. Mit USB-Strom tritt der Fall nicht ein.
3	Die Schreibposition des Logs wird nur alle 50 Einträge, alle 10 min und vor dem Schlaf gesichert.	Nach einem Stromausfall werden bis zu 49 Einträge überschrieben.
4	Die Ruhelage accelBaseline liegt nur im RTC-Speicher, nicht in config.bin.	Nach einem Stromausfall gilt wieder 1.0 g. Eine erfasste Ruhelage muss neu erfasst werden.
5	Im Standalone-Modus gibt es nach einem Stromausfall keine Zeitquelle.	Ereignisse bekommen den Zeitstempel 0. Das Cockpit zeigt davon nur Schocks, der Export enthält alle.

Nr.	Beobachtung	Folge
6	Schock wird wach (±2 g, Betrag mit Erdanziehung) und im Schlaf (±8 g, ohne Erdanziehung) unterschiedlich gemessen.	Im Wachbetrieb sättigen starke Schläge am Messbereich, der geloggte Spitzenwert ist dann eine Untergrenze. Derselbe Schlag kann wach und im Schlaf unterschiedlich bewertet werden.
7	Ein Werkzeug mit einer Zykluszeit über 60 s fällt in den Unterbruch, bevor der nächste Zyklus kommt.	Die Zeitgrenze ist fest im Code. Für langsame Werkzeuge müsste sie einstellbar werden.
8	Beim Anfahren aus dem Lager öffnet und schliesst die Form, bevor das Zyklusmuster bestätigt ist.	Im Log entstehen für die ersten Zyklen kurze Wechsel Lager zu Werkzeug offen, bevor Produktion beginnt. Aus dem Unterbruch passiert das nicht.
9	Die PIN wird nur im Browser geprüft, nicht an den Speicher-Adressen. Das WLAN-Passwort liegt im Klartext in config.bin.	Die PIN schützt vor Fehlbedienung, nicht vor einem gezielten Zugriff aus dem Netzwerk (Kapitel 11.7).
10	Die Kaltstart-Erkennung aus Kapitel 6.3 ist nicht umgesetzt.	Der BME280 misst die Umgebung, nicht die Temperatur des Werkzeugs. Dafür ist der externe Anschluss «E» vorgesehen (Kapitel 8.4).Erkannt wird feuchte Umgebungsluft (rF über rund 82 %). Nicht erkannt wird ein kaltes Werkzeug in warmer Luft, ein technisch relevantes Szenario nach einem Transport. Dafür ist der Anschluss «E» vorgesehen (Kapitel 15). Die Kaltstart-Erkennung aus Kapitel 6.3 ist aus demselben Grund nicht umgesetzt.
11	Slot-Funktionen ausser «Formtrennung / Zyklus» werden gespeichert und angezeigt, aber nicht ausgewertet.	Auswerfer-, Kernzug- und Roboterschalter wecken aus dem Light Sleep, erzeugen aber keine Ereignisse. Sie sind für eine spätere Version vorbereitet. Sie waren im Pflichtenheft nicht erwähnt und wurden somit auch nicht fertig umgesetzt.

12 Test und Validierung

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Bewertung der Zielerreichung und fachliche Entscheidungen stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 9).

Die Funktion des Prototyps wurde in fünf Tests überprüft. Jeder Test ist einer oder mehreren Anforderungen aus dem Pflichtenheft (Kapitel 4.1) zugeordnet. Die Versuchsreihe zur Schock-Schwelle ist in Kapitel 8.4.4 beschrieben. Die Ergebnisse dieses Kapitels sind die Grundlage für die Anforderungsprüfung in Kapitel 13.

Tabelle 43 - Übersicht der durchgeführten Tests

Test	Bezeichnung	Geprüfte Anforderungen	Zeitraum	Ergebnis
T1	Funktionstest Inbetriebnahme und Schnittstelle	F01, F03, F06, F07, F08, F09, W04	September 2026	bestanden
T2	Dauerlauf am Maschinensimulator	F01, F04, F05, F08	04.10.2026 - 07.10.2026	bestanden
T3	Falltest Schockerkennung	F02	03.10.2026	bestanden
T4	Transport- und Lagertest im Akkubetrieb	W05	14 Tage, 04.10.2026	bestanden
T5	Bedientest mit Werkzeugbauern	F07, W02	16.10.2026, Ypsomed AG	bestanden

12.1 T1 Funktionstest Inbetriebnahme und Schnittstelle

Ziel
Nachweis, dass das Gerät ohne IT-Kenntnisse eingerichtet werden kann, dass alle Messwerte und Ereignisse im Cockpit erscheinen und dass die HTTP-Schnittstelle die dokumentierten Daten liefert.

Aufbau und Durchführung
Fertig montiertes Sensor-Modul, Smartphone (iOS) und Laptop. Das Gerät wurde auf Auslieferungszustand zurückgesetzt und gemäss Kapitel 9.2 eingerichtet: QR-Code scannen, Captive Portal, Netzwerkwahl, Werkzeugdaten, Endschalter zuordnen, Grenzwerte bestätigen. Anschliessend wurden die drei Adressen /api/status, /api/events und /api/export im Browser aufgerufen und die Antworten mit der Spezifikation in Anhang B verglichen. Der Standalone-Modus wurde ohne Firmen-WLAN und ohne Internetverbindung geprüft.

Ergebnis
Das Captive Portal öffnete sich nach dem Scannen des QR-Codes ohne Eingabe einer IP-Adresse. Alle Konfigurationsseiten liessen sich auf dem Smartphone bedienen. Temperatur, Feuchte, Taupunkt und Zustand wurden im Cockpit angezeigt; ein künstlich erzeugtes Kondensationsrisiko (Sensor angehaucht) erschien auf der Zeitachse. Die drei Schnittstellenadressen lieferten JSON mit den dokumentierten Feldern. Im Standalone-Modus war der volle Funktionsumfang ohne Netzwerk verfügbar.

12.2 T2 Dauerlauf am Maschinensimulator

Ziel
Nachweis, dass über mehrere Tage kein Zyklus verloren geht, dass Produktionsblöcke und Unterbrüche korrekt erkannt werden und dass die Speicherarchitektur die Daten zuverlässig ablegt.

Aufbau
Als Maschinensimulator diente ein zweiter ESP32, der die Endschaltersignale eines Spritzgusswerkzeugs simulierte. Die Zyklusdauer variierte zufällig zwischen ca. 10,6 und 11,1 Sekunden. Bei rund 10 % der Zyklen wurde die Spritzgiessphase verlängert, wodurch Zykluszeiten von ca. 14,1 bis 14,3 Sekunden entstanden.

Zusätzlich simulierte der ESP32 in zufälligen Abständen Produktionsunterbrüche. Das Sensor-Modul war über USB mit Energie versorgt und im WLAN-Modus eingebunden.

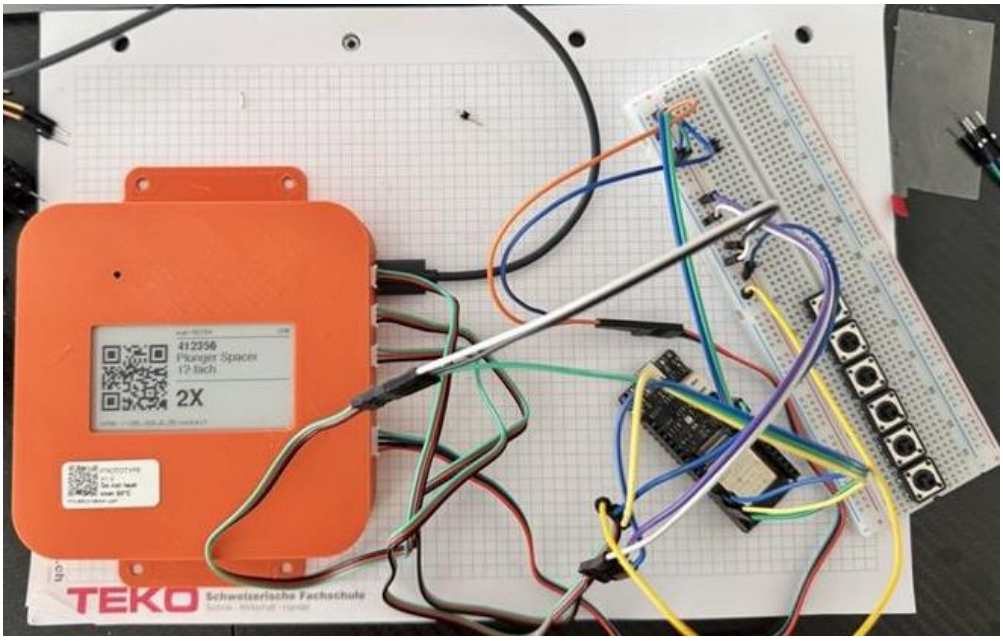


Abbildung 73 - Testaufbau Dauerlauf mit Maschinensimulator (Quelle: Eigenes Foto)

Durchführung

Ein erster Lauf über 16 Stunden mit 5'040 Zyklen zeigte eine fehlerfreie Zählung, prüfte aber den Zustandsautomaten nicht: Die Unterbrüche des Simulators waren mit höchstens 38 s kürzer als die Unterbruchgrenze der Firmware von 60 s, das Gerät blieb durchgehend im Zustand Produktion. Der Test wurde deshalb mit Unterbrüchen von 90 s bis 5 min wiederholt. Der zweite Lauf dauerte vom 04.10.2026, 16:28 Uhr bis zum 07.10.2026, 19:56 Uhr, also 75.5 Stunden. Der Zählerstand wurde am Ende mit der Vorgabe des Simulators verglichen, der Logspeicher über /api/export ausgelesen (Anhang H).

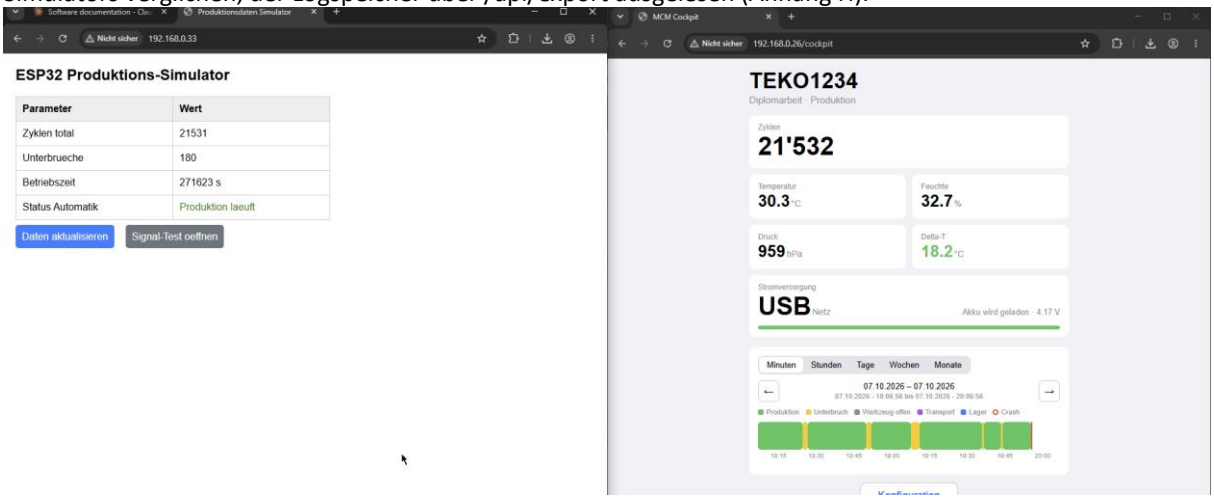


Abbildung 74 - Cockpit nach Abschluss des 75-h-Dauerlaufs (Quelle: Eigener Screenshot

Ergebnis

Tabelle 44 - Ergebnis des 75-h-Dauerlaufs

Grösse	Wert	Bemerkung
Dauer	75.5 h	04.10. 16:28 bis 07.10. 19:56
Zyklen Simulator	21'532	Vorgabe
Zyklen Sensor-Modul	21'532	Abweichung 0
Erkannte Unterbrüche	172	alle Unterbrüche über 60 s
Einträge im Log	797	453 Klima, 343 Zustandswechsel, 1 Konfiguration
Einträge pro Tag	253	Reichweite rechnerisch rund 316 Tage
Klima-Intervall	10 min	wie in Kapitel 8.8 definiert

Alle Zyklen wurden erfasst, jeder Unterbruch über 60 s wurde als Zustandswechsel Produktion/Unterbruch gespeichert, und die Klimamessung lief im vorgesehenen 10-Minuten-Raster. Die 797 Einträge entsprechen rund 253 pro Tag; damit reicht der Speicher auch bei dieser dichten Unterbruchfolge für rund 316 Tage, deutlich mehr als die geforderten 48 Stunden (F05). Die höhere Rate gegenüber der Annahme in Tabelle 10 stammt aus den künstlich häufigen Unterbrüchen des Simulators.

12.3 T3 Falltest Schockerkennung

Ziel

Nachweis, dass ein harter Stoss zuverlässig als Schock-Ereignis mit Zeitstempel und Spitzenwert protokolliert wird, im Wachbetrieb und aus dem Schlaf.

Aufbau und Durchführung

Das Modul wurde auf die Küchentischplatte gelegt und fünfmal aus 65 cm Höhe fallen gelassen, Schwelle 1.5 g. Zwischen den Stürzen wurde das Gerät im Wachbetrieb belassen und in den Schlaf versetzt. Nach jedem Sturz wurde im Cockpit geprüft, ob ein Schock-Ereignis mit Spitzenwert erschien und ob der Buzzer die Schock-Melodie spielte.

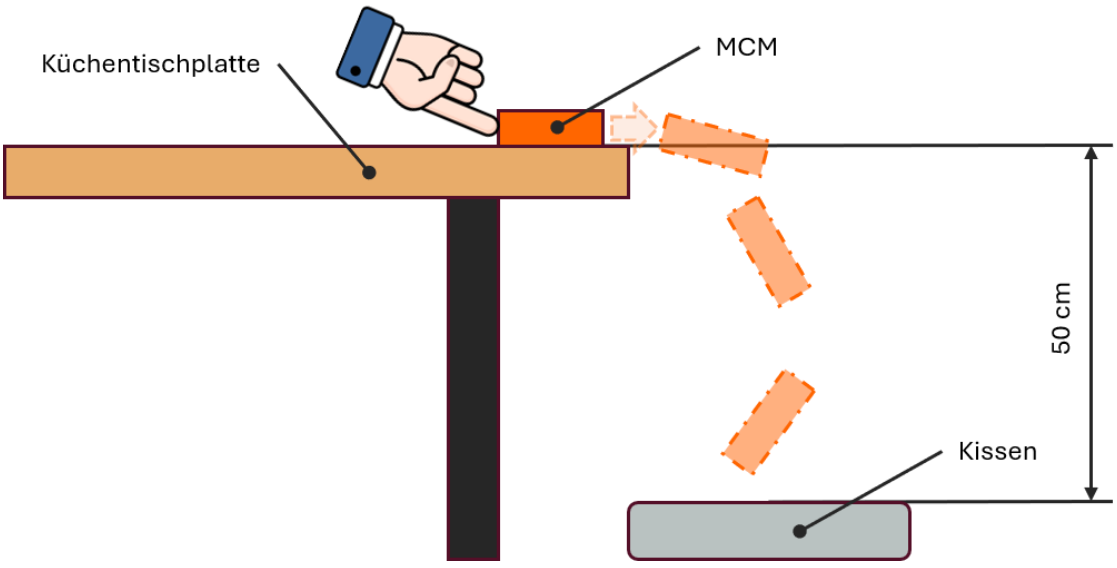


Abbildung 75 - Versuchsanordnung Falltest (Quelle: Eigene Darstellung)

Ergebnis
Alle fünf Stürze wurden als Schock-Ereignis erkannt und mit Zeitstempel und Spitzenwert im Log abgelegt. Die Spitzenwerte lagen zwischen 2.8 und 4.6 g. Der Buzzer quittierte jeden Schock. Die Versuchsreihe zur Festlegung der Schwelle ist in Kapitel 8.4.4 dokumentiert.

12.4 T4 Transport- und Lagertest im Akkubetrieb

Ziel
Nachweis, dass das Modul ohne USB-Versorgung über längere Zeit arbeitet, dass es Transporte und Lagerphasen selbständig erkennt und dass der Akku für diese Phasen reicht.

Aufbau und Durchführung
Das voll geladene Modul wurde ohne USB-Kabel über 14 Tage betrieben. In dieser Zeit lag es überwiegend still (Zustand Lager) und wurde mehrfach kurz bewegt und transportiert z. B. im Auto, oder Hand getragen. Zu Beginn und am Ende wurde die Akkukapazität im Cockpit abgelesen, dazwischen die Zustandswechsel im Log kontrolliert.

Ergebnis

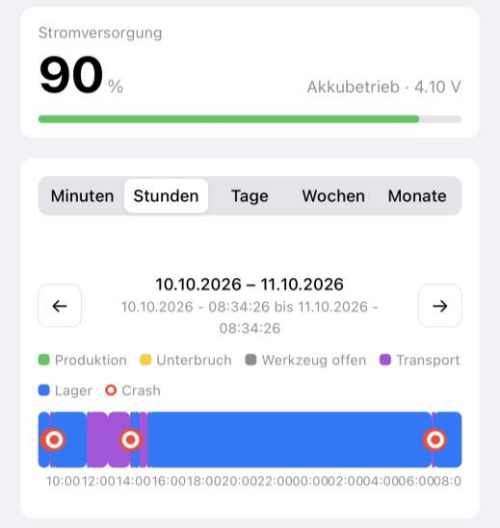


Abbildung 76 - Screenshot aus /cockpit vom MCM (Quelle: Selbst erstellt)

Abbildung 76 zeigt in der Zeitleiste einen für diesen Versuch relevanten Bereich der häufig wechselnde Transport-/Lagerphasen sowie Crash Erkennungen aufzeigt.

Das Modul lief über die 14 Tage ohne Nachladen. Der Ladestand des Akkus sank von 100% auf 90 %. Transporte wurden als Zustand Transport erkannt und nach der Ruhephase wieder in Lager überführt; Stösse beim Hantieren erschienen als Schock-Ereignisse. Die Klimamessung lief im Schlaf weiter. Der Test bestätigt die Grössenordnung der berechneten Akkulaufzeit (Kapitel 8.8.1), ersetzt aber keine Strommessung; die Stromaufnahme wurde nicht gemessen.

12.5 T5 Bedientest mit Werkzeugbauern

Ziel
Nachweis, dass Anwender aus dem Werkzeugbau das Gerät ohne Anleitung und ohne IT-Kenntnisse einrichten können (F07) und dass die Begriffe der Bedienoberfläche verstanden werden (W02).

Aufbau und Durchführung
Zwei Werkzeugbauer der Ypsomed AG erhielten das Modul im Auslieferungszustand, ein Netzteil und ein Smartphone. Die Aufgabe lautete: «Richte das Gerät für ein Werkzeug deiner Wahl ein.» Es wurde keine Anleitung abgegeben und keine Hilfe geleistet. Beobachtet wurden Dauer, Rückfragen und Abbrüche.

Ergebnis
Beide Personen richteten das Gerät vollständig ein, in 15 und 12 Minuten. Es gab keine Rückfragen zu Begriffen der Oberfläche und keine Abbrüche. Der Test ist eine Stichprobe mit zwei Personen; er zeigt, dass das Bedienkonzept für die Zielgruppe funktionieren kann, nicht mehr.

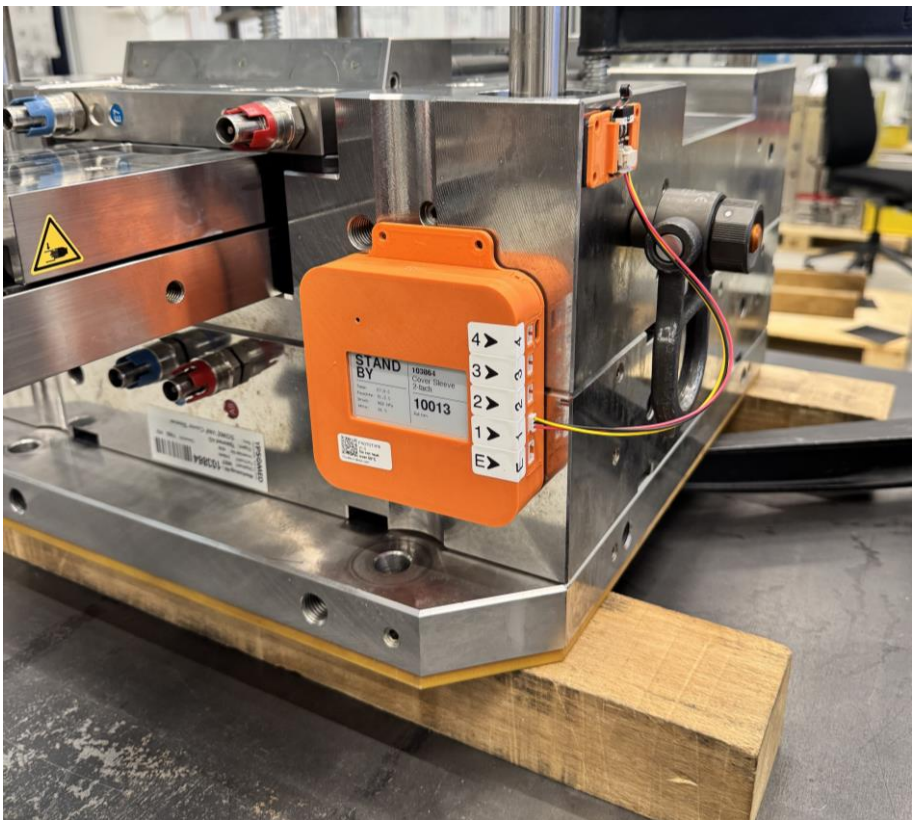


Abbildung 77 - Modul mit Magneten am Spritzgusswerkzeug montiert (Quelle: Selbst gemachtes Bild)

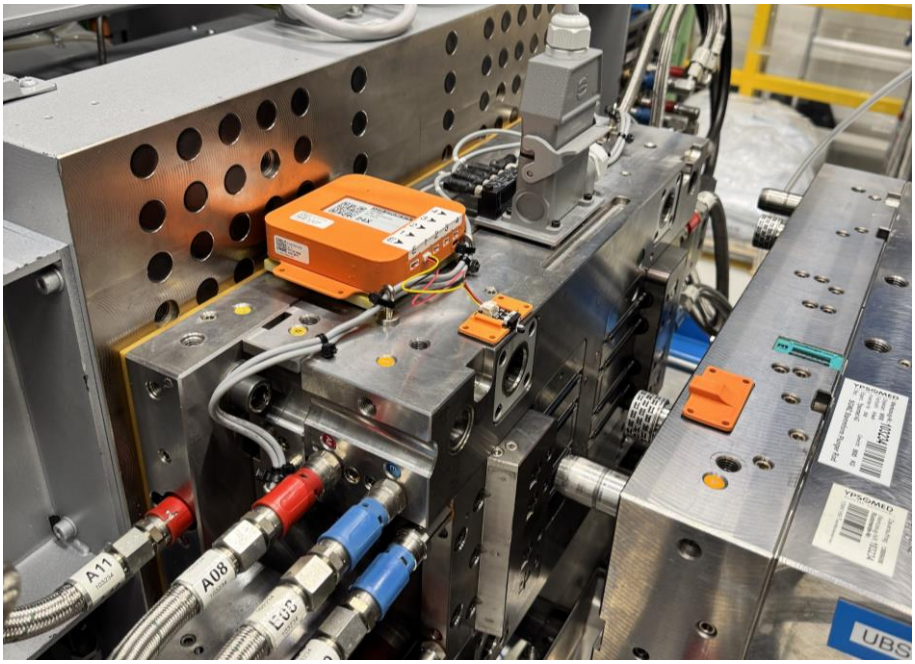


Abbildung 78 - Modul in der Produktion, dazwioschen eine Wärmeschutzplatte (Quelle: Selbst gemachtes Bild)

Beim Test auf der Spritzgussmaschine wurden aufgrund des eingestellten Schwellenwerts einige Crash eregnisse protokolliert. Daraus folgt die Notwendigkeit einer werkzeugspezifischen Schwellenwert-Einstellung.

13 Überprüfung der Anforderungen

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) erstellt; Bewertung der Zielerreichung und fachliche Entscheidungen stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 10).

Dieses Kapitel hält die Ergebnisse gegen die Vorgaben: Zuerst gegen die Ziele des Pflichtenhefts (Kapitel 4.1) in Kombination mit Erwähnung der Themeneingabe, zuletzt gegen den Terminplan (Kapitel 5).

Massstab sind die Tests in Kapitel 12. Wo eine Anforderung nur teilweise erfüllt ist, steht die Begründung daneben.

13.1 Pflichtenheftprüfung

Massgebend ist das Pflichtenheft in Kapitel 4.1; es ist aus der Themeneingabe (Anhang A) abgeleitet und als oberste Vorgabe freigegeben.

Tabelle 45 - Pflichtenheftprüfung, Festanforderungen

P-Nr.	Themeneingabe	Status	Nachweis und Kommentar
F01	M1	erfüllt	Temperatur und Feuchte über BME280 (8.4.3). Messintervalle je Betriebsphase hergeleitet und begründet (11.2, Tabelle 24): 10 min wach, 10/30/60 min im Lager, 10 min bei Taupunktnähe. Geprüft in T1 und über 75 h in T2.
F02	M2	erfüllt	Schock über LIS2DH mit Hardware-Interrupt, Ereignis mit Zeitstempel und Spitzenwert im Log (11.3). Schwelle 1.5 g aus Versuchsreihe hergeleitet (8.4.4), konfigurierbar. Geprüft in T1 und im Falltest T3 (5 von 5). Grenze: wach und im Schlaf wird verschieden gemessen (11.8, Nr. 6). Die Versuche erfolgten bei 2.0 g, der konfigurierbare Firmware-Standard ist 1.5 g.
F03	M3	erfüllt	Taupunkt nach Magnus-Formel, Schwelle ΔT = 3 °C hergeleitet mit Toleranzbetrachtung (6.4), Ereignis mit Zeitstempel im Log (11.3), geprüft in T1. Physikalische Grenze: Das Kriterium erkennt feuchte Umgebungsluft, nicht ein kaltes Werkzeug in warmer Luft; dafür ist der Anschluss «E» vorgesehen (6.4.2, 15).
F04	M4	erfüllt	Zyklen per Interrupt am konfigurierbaren Eingang, Produktionsblöcke mit Start und Stopp aus dem Zustandsautomaten, Zykluszeit aus Zählerstand und Zeitstempel (11.3, 11.4). Geprüft über 75 h gegen Simulator: 21’532 Zyklen, Abweichung 0 (T2).
F05	M5	erfüllt	Ereignismodell, Datensatz 24 Byte, Ringpuffer 80'000 Plätze in LittleFS (8.7, 11.6). Reichweite unter dokumentierten Annahmen 470 Tage in Dauerproduktion (8.7.4). 48 Stunden: Reserve Faktor 235 rechnerisch; im Dauerlauf 797 Einträge in 75.5 h (T2). Überschreiben bei vollem Puffer nicht erprobt (Kapitel 12).
F06	M7	erfüllt	HTTP/JSON-Schnittstelle mit drei Adressen, Feldern je Ereignistyp und Regeln für die Anbindung (11.7, Anhang B). Geprüft in T1 mit Browser. Das Cockpit selbst nutzt dieselbe Schnittstelle, der Nachweis der Anbindbarkeit ist damit erbracht.
F07	M6	erfüllt	Einrichtung über QR-Code auf dem Display und Smartphone-Browser, ohne IP-Eingabe, ohne App (9.2). Konfigurationsparameter und Ablauf dokumentiert (9.2, Tabelle 15). Das Pflichtenheft lässt Smartphone oder Laptop ausdrücklich zu. Geprüft mit Werkzeugbauern bei Ypsomed ohne Hilfe (T5).
F08	Hauptziel	erfüllt	USB-C in der Produktion, Erkennung ohne Zusatzbauteil über den USB-Seriell-Wandler (11.3). Geprüft in T1 und T2 (75.5 h am Netzteil).
F09	Abgrenzung	erfüllt	Standalone-Modus ohne Netzwerk, alle Funktionen ohne Internet und Backend (8.6, 9.2). Geprüft in T1. Im WLAN-Modus wird nur der Zeitserver genutzt; fehlt er, läuft die Uhr weiter (11.6).

P-Nr.	Themeneingabe	Status	Nachweis und Kommentar
F10	Abgrenzung	erfüllt	Keine Verbindung zur Maschinensteuerung; die Endschalter sind potenzialfreie Kontakte am Werkzeug (8.4.5). Keine Schmelzeparameter.
F11	Abgrenzung	erfüllt	Ein Modul auf Werkzeughälfte, keine Synchronisation (3.4, 8.2).
F12	Hauptziel	erfüllt	Veröffentlichung unter MouldCondition.com / https://github.com/wandelbar/MCM . Lizenz: Hardware und Dokumentation CC BY-NC-SA 4.0, Firmware GPL-3.0; Nutzung und Nachbau frei, kommerzieller Vertrieb nur mit Lizenz des Verfassers. Begründung in Kapitel 15.3.
F13	Hauptziel	erfüllt	Stückliste mit Bezugsquellen (10.3), Schaltplan (10.1, Anhang C), Firmware (Anhang D), Zusammenbau Schritt für Schritt (10.3, Tabelle 22), Gehäuse als Druckdaten (STL im Repository).

Tabelle 46 - Pflichtenheftprüfung, Wunschanforderungen

Nr.	Ziel	Gew.	Status	Nachweis und Kommentar
W01	K4	1	nicht erfüllt	CSV-Export nicht umgesetzt. Der Export liefert JSON (/api/export), das sich mit einer Zeile in jeder Tabellenkalkulation einlesen lässt. Bewusst zurückgestellt zugunsten der Muss-Ziele; Aufwand in der Firmware gering (Kapitel 15).
W02	Kap. 6.6	3	erfüllt	Begriffe des Werkzeugbaus in der Oberfläche: Formtrennung, Auswerfer, Kernzug, EQ-Nr, Fachzahl (9.1). Beim Bedientest wurden keine Begriffe nachgefragt (T5).
W03	K1	1	nicht erfüllt	Keine aktive Übermittlung an ein Backend. Entscheid aus Kapitel 3.4: Das Gerät sendet nie selbst, das Backend fragt ab (11.7). Im Standalone-Modus stellt das Sensor-Modul ein eigenes lokales WLAN bereit, mit dem sich der Anwender direkt verbinden kann. Eine Einbindung in das bestehende Firmennetzwerk oder eine Internetverbindung ist nicht erforderlich. Dadurch kann das System unabhängig von der betrieblichen Netzwerkinfrastruktur verwendet werden. Eine Push-Variante (MQTT) ist im Ausblick.
W04	Kap. 6.6	1	erfüllt	Captive Portal: Smartphone tritt dem Geräte-WLAN bei, Anmeldeseite öffnet von selbst (9.2, 11.7). Geprüft in T1 auf iOS.
W05	K2	3	teilweise	Akkubetrieb mit 18650-Zelle, drei Schlafstufen, Laden über USB (8.8, 11.5). Betriebsdauer berechnet: 16 h wach, 50 Tage Light Sleep, 189 Tage Deep Sleep, Seetransport mit 30 Tagen Restlager (8.8.1). Nicht gemessen: Stromaufnahmen und Entladung; die Rechnung ist eine modellierte Laufzeit unter den definierten Annahmen. Transporttest über 14 Tage ohne Nachladen bestanden (T4).
W06	K3	3	teilweise	Das Pflichtenheft verlangt eine Warnung beim Einlagern ohne Energieversorgung. Umgesetzt ist die Warnung dort, wo der Akku in Stunden leer wäre: Produktion ohne Netzstrom (Banner und Warnton, 11.3). Im Lager ist das Gerät auf Akkubetrieb ausgelegt (189 Tage), ein Warnton beim Einlagern wäre dort ein Fehlalarm. Die Umdeutung ist bewusst und in Kapitel 8.8 begründet.
W07	Hauptziel	3	erfüllt	Materialkosten CHF 98.37 (Stückliste 10.3), unter CHF 300.
W08	Kap. 6.6	2	erfüllt	Alle Aussenanschlüsse JST-PH, verpolungssicher (8.5, 10.1). Ausnahme im Gehäuse: LIS2DH über Dupont, nur einmal gesteckt. Reverse-Side-Thema beim Gravity-Kabel erkannt und dokumentiert (8.5.2).
W09	Kap. 6.6	2	erfüllt	Alle Teile über Bastelgarage, DFRobot, JLCPCB als Privatperson bestellt (10.3).

Nr.	Ziel	Gew.	Status	Nachweis und Kommentar
W10	Kap. 6.6	2	erfüllt	Gravity-Kabel vorkonfektioniert, Display über mitgeliefertes Kabel (8.5).

Ergebnis: 13 von 13 Festanforderungen erfüllt, davon F03 und F04 mit dokumentierter physikalischer beziehungsweise zeitlicher Grenze. Von den zehn Wunschanforderungen sind sechs erfüllt, zwei teilweise (W05 ohne Messung, W06 umgedeutet) und zwei mit Gewichtung 1 bewusst nicht umgesetzt (W01, W03).

13.2 Zeitkontrolle (Soll/Ist)

Tabelle 47 stellt die Meilensteine aus Kapitel 5.2 dem tatsächlichen Datum gegenüber. Der Gantt-Chart mit Soll und Ist liegt in Anhang E.

Tabelle 47 - Meilensteine Soll und Ist

MS	Bezeichnung	Soll	Ist	Abweichung, Grund
MS1	Freigabe Pflichtenheft	08.09.2026	08.09.2026	
MS2	Planung abgeschlossen	09.09.2026	09.09.2026	
MS3	Bewertungsmethodik freigegeben	12.09.2026	12.09.2026	
MS4	Komponententest erfolgreich (MVP)	16.09.2026	16.09.2026	
MS5	Schwellenwerte definiert	17.09.2026	19.09.2026	Versuchsreihe mit 2.0 g durchgeführt; Firmware-Standardwert auf 1.5 g festgelegt (8.4.4)
MS6	Pinbelegung gefreezt	16.09.2026	15.09.2026	Zwei Korrekturen nach Lieferung (Tabelle 18), ohne Neubestellung
MS7	Design Freeze PCB	18.09.2026	19.09.2026	Verzug aufgrund Ressourcen am Arbeitsplatz
MS8	PCB-DFM bestanden	18.09.2026	19.09.2026	Verzug aufgrund Ressourcen am Arbeitsplatz
MS9	PCB bestellt	18.09.2026	20.09.2026	Expressversand USD 42.34
MS10	Montage mechanisch erfolgreich	30.09.2026	30.09.2026	Gehäuse V0 mit Displaykollision, V1.0 nachgedruckt (10.2)
MS11	Funktion elektrisch erfolgreich	01.10.2026	03.10.2026	nach Rework VCC und GPIO34/39
MS12	Software erfüllt Anforderungen	09.10.2026	09.10.2026	
MS13	Schnittstellendokument finalisiert	11.10.2026	02.10.2026	
MS14	Abgabe	02.11.2026	02.11.2026	
MS15	Abschluss (Präsentation)	14.11.2026		

Der kritische Pfad (Kapitel 5.3) hat gehalten: Die Platine kam am 28.09.2026 und war am 01.10.2026 elektrisch in Betrieb. Puffer 2 (11. bis 24.10.) für eine Neubestellung wurde nicht gebraucht, weil beide Platinenfehler am Prototyp korrigierbar waren (Risiko R1 eingetreten, Massnahme hat gewirkt). Die Zeit floss stattdessen in die Dokumentation. Geplant waren 216 Stunden, aufgewendet 229 Stunden. Die grösste zeitliche Abweichung trat beim CAD Design auf, wo ich mehr als nur ein einfaches Gehäuse entwickelt habe. Der Anspruch war ein möglichst produktnahes Gehäuse darzustellen. Auch der Test in der Ypsomed hat sich zwischenzeitlich als Gelegenheit ergeben, der aber für diese Arbeit äusserst wertvolle Einblicke bietet.

14 Reflexion und Diskussion

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) sprachlich und strukturell mit KI überarbeitet; Erfahrungen, Bewertungen und Meinungen stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 11).

Die Anleitung Technischer Bericht verlangt im Schlussteil zwei Dinge: eine ehrliche Rückschau auf den Weg zum Ziel und eine Einordnung der Ergebnisse gegen die Ziele und gegen den Stand der Technik. Ich beginne mit der Rückschau, weil sie erklärt, warum die Ergebnisse so aussehen, wie sie aussehen.

14.1 Reflexion und Lessons Learned

Was gut lief

Die Reihenfolge der Arbeit. Risikoanalyse vor dem Pflichtenheft, Bewertungsmerkmale und Gewichtung vor der ersten Variante, Breadboard-Test vor dem Platinenlayout, gedruckte Platinenattrappe vor der Bestellung. Jeder dieser Schritte hat später einen Fehler abgefangen, bevor er Geld oder Wochen gekostet hätte. Am deutlichsten bei der Platine: Der Umriss kam aus dem CAD, die Attrappe lag im Gehäuse, bevor JLCPCB einen Auftrag hatte. Das Gehäuse passte beim ersten Druck bis auf 1.6 mm am Display. Ohne die Attrappe wäre das eine zweite Platine gewesen.

Die Anwenderstudie. Die Annahme «Werkzeugmacher richten keine IT ein» hätte ich aus Erfahrung einfach setzen können. Stattdessen habe ich zwölf Stelleninserate ausgewertet. Das hat zwei Dinge gebracht: Die Annahme wurde durch die Untersuchung gestützt, und aus der Kompetenzmatrix sind konkrete Anforderungen entstanden (W02, W04, W08, W10), die ich sonst nicht formuliert hätte. Der Bedientest bei Ypsomed hat die Kette geschlossen: Zwei Werkzeugbauer haben das Gerät ohne Hilfe eingerichtet.

Die Lehre aus der Transferarbeit. Dort hatte die Display-Integration viele Stunden gekostet. Diesmal war das Display das erste, was auf dem Breadboard lief, und der Footprint des FireBeetle kam aus einer bereits gefertigten Platine. Beides hat gehalten.

Was schiefging

Zwei Fehler auf der Platine (Tabelle 18). Die Module hingen am ungeregelten VCC-Pin mit 4.84 V statt an 3V3, und der Schock-Interrupt lag auf GPIO34, dem einzigen Pin des Akku-Spannungsteilers. Beide Fehler hatten dieselbe Ursache: Ich habe die Pinbelegung des FireBeetle nicht mit allen Anforderungen im Blick übernommen. Gerade beim Spannungsteiler habe ich auf dem offiziellen Pinout Dokument des Herstellers keine anmerkung gesehen und bin deshalb davon ausgegangen, dass sämmtliche Analog-Pins des Boards die Messung übernehmen können. Beide Fehler waren mit Seitenschneider und Lötkolben korrigierbar, und genau dafür war der Puffer im Terminplan reserviert. Die Lehre ist trotzdem eindeutig: Vor dem Design Freeze jeden Pin gegen das Herstellerschema prüfen, nicht gegen die Abbildung «Pin-Layout».

Ein gespiegelter Footprint hat zwei Abende gekostet. Für die JST-Buchsen gab es in EasyEDA kein offizielles Bauteil; beim Bibliotheksbauteil war die Nummerierung im Footprint um 180 Grad gedreht. Alle Durchgangsmessungen waren unauffällig, nur die Signale lagen auf den falschen Pins. Ich habe lange in der Firmware gesucht, weil die Hardware «gemessen in Ordnung» war. Lehre: Wenn Hardware und Software beide richtig aussehen, liegt der Fehler in der Zuordnung zwischen Schema und Platine.

Der erste Dauerlauf hat nichts geprüft, was er prüfen sollte. Der Simulator legte alle 5 bis 40 Minuten einen Unterbruch von höchstens 38 s ein. Die Firmware erkennt einen Unterbruch erst nach 60 s. Das Modul blieb 16 Stunden in der Produktion und zählte 5'040 Zyklen fehlerfrei, aber den Zustandsautomaten hat der Test nicht berührt. Aufgefallen ist das erst beim Schreiben von Kapitel 12, als die Zahlen des Simulators neben den Grenzen der Firmware standen. Der Test wurde mit Unterbrüchen von 90 s bis 5 min über 75 Stunden wiederholt. Lehre: Einen Test gegen die Zahlen entwerfen, die er prüfen soll, nicht gegen das, was realistisch aussieht.

Die Physik der Kondensation habe ich zu spät zu Ende gedacht. Das Kriterium $\Delta T < 3$ °C ist in Kapitel 6.4 sauber hergeleitet, und F03 ist damit erfüllt. Dass es nur die Hälfte der Fälle erkennt, nämlich feuchte Luft, aber nicht das kalte Werkzeug in warmer Luft, ist mir erst nach dem Bau aufgefallen. Ein zweiter Temperaturfühler am Stahl wäre im Pflichtenheft eine Zeile gewesen; der Anschluss «E» dafür existiert sogar. Lehre: Bei jeder Messgrösse fragen, welche physikalische Grösse sie wirklich ersetzt, bevor die Anforderung steht.

Zusammenarbeit mit KI
Die KI-Unterstützung beschleunigte das Schreiben des Codes, nicht dessen Verstehen. Kein Modul lief beim ersten Versuch so, wie es sollte: Interrupt-Verhalten, Schlafübergänge und Zustandswechsel mussten am Gerät beobachtet, die Abweichung beschrieben und der Code in vielen Durchgängen nachgeführt werden. Dabei entstanden auch Fehler, die nur durch Nachrechnen und Nachmessen auffielen. Die Lehre daraus: KI-generierten Code und KI-generierte Zahlen konsequent gegen Gerät, Datenblatt und eigene Rechnung prüfen.

Was ich anders machen würde
- Die Stromaufnahme in der ersten Woche messen, nicht in der letzten. Ein USB-Messgerät für CHF 15 hätte die Akkurechnung von Annahmen auf Messwerte gestellt.
- Den Werkzeugtemperatur-Fühler ins Pflichtenheft nehmen. Der Anschluss ist da, die Auswertung fehlt.
- Die Firmware-Konstanten (Schock-Schwelle, Unterbruch 60 s, Stillstand 10 min) von Anfang an in die Konfiguration legen statt in den Code. Jede davon hat sich im Verlauf als werkzeugabhängig erwiesen.
- Früher kürzen. Die Arbeit ist mit über 120 Seiten zu lang. Die Detailtabellen der Firmware gehörten in den Anhang.

14.2 Diskussion der Ergebnisse

Sind die Ziele erreicht?
Ja. Alle dreizehn Festanforderungen sind erfüllt und am Gerät geprüft. Das Gerät beantwortet die vier Fragen aus Kapitel 11: wie viel produziert, in welchem Zustand, was zugestossen, unter welchen Bedingungen. Es tut das ohne Backend, ohne Cloud und ohne IT-Kenntnisse bei der Einrichtung, und es kostet CHF 98.37 an Material. Die Fitness-Tracker-These aus Kapitel 3.1, dass ein günstiger Logger, der am Werkzeug bleibt, eine Lücke füllt, hat den Bedientest bei Ypsomed überstanden: Werkzeugbauer haben das Gerät ohne Anleitung eingerichtet und fanden es grossartig.

Was die Zahlen bedeuten
21’532 Zyklen in 75 Stunden ohne Abweichung sind kein Zufallsergebnis, sondern die Folge einer Entscheidung: Zyklen werden per Interrupt gezählt, nicht abgefragt. Jede andere Architektur hätte beim Neuzeichnen des Displays Zyklen verloren. Dasselbe gilt für die 48 Stunden Datenhaltung: Der Faktor 235 kommt nicht aus einem grossen Speicher, sondern aus dem Entscheid, Ereignisse zu speichern statt Messwerte. Beide Zahlen sind Belege für Kapitel 8, nicht nur für Kapitel 11.

Die 189 Tage Akkulaufzeit sind dagegen eine Rechnung, keine Messung, und sie sind empfindlich: Fünf Stösse pro Tag im Lager halbieren sie. Das ist kein Mangel des Geräts, sondern des Nachweises. Der Transporttest über 14 Tage zeigt, dass die Grössenordnung stimmt, mehr nicht.

Grenzen, die zählen
Drei Grenzen sind für den Einsatz relevant, nicht nur für die Vollständigkeit. Erstens erkennt das Gerät Kondensationsrisiko nur aus der Luft; das kalte Werkzeug nach dem Transport, der häufigste Fall, bleibt unerkannt. Zweitens hängt die Montagetemperatur am Akku: Laden über 45 °C ist nicht zulässig, das Modul muss an eine kühle Stelle z.B. an der Aufspannplatte. Drittens driftet die Uhr im Standalone-Modus ohne Abgleich. Für die Zuordnung eines Schocks zu einer Schicht reicht das, für eine Minute nicht. Alle drei haben eine bekannte Lösung mit geringem Aufwand und alle drei hätte ich früher sehen können. Sie stehen hier, damit der Leser sie nicht selbst finden muss.

Einordnung gegen den Markt
Die Systeme aus Kapitel 6.5 (Kistler, Hack, männer, Digital Moulds) sind entweder Prozessüberwachung in der laufenden Maschine oder Zustandsüberwachung mit Cloud. Keines davon ist falsch. Sie beantworten andere Fragen. Das Sensor-Modul schaut nicht in den Prozess, es schaut auf das Werkzeug zwischen den Prozessen, und es schickt die Daten nirgendwohin. Das macht es für einen Medtech-Betrieb einsetzbar, der keine Produktionsdaten nach aussen geben darf, und für einen kleinen Betrieb, der keinen Investitionsantrag stellen will. Es macht es gleichzeitig zu einem Gerät, das nur im Problemfall ausgelesen wird. Ob das in der Praxis geschieht, ist die offene Frage, die nur ein Feldversuch über Monate beantwortet.

Meine Einschätzung
Das Gerät ist als Proof of Concept gelungen und als Produkt noch nicht fertig. Die Lücke liegt nicht in der Elektronik oder der Firmware, sondern in drei Dingen, die ein Proof of Concept nicht leisten muss: ein Gehäuse

für die Werkzeugumgebung, ein Feldversuch an echten Werkzeugen, und der zweite Temperaturfühler. Mit diesen drei Schritten ist das, was auf dem Tisch liegt, ein Gerät, das ich in meinem eigenen Werkzeugbau einsetzen würde. Das ist der Massstab, den ich mir am Anfang gesetzt habe.

15 Fazit Empfehlung und Ausblick

Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) sprachlich und strukturell mit KI überarbeitet; Erfahrungen, Bewertungen und Meinungen stammen vom Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 12).

15.1 Fazit

Ziel war ein funktionsfähiger Prototyp eines kostengünstigen Condition-Monitoring-Systems, das dauerhaft am Spritzgusswerkzeug bleibt und dessen Zustand über alle Betriebsphasen aufzeichnet. Dieses Ziel ist erreicht. Das Sensor-Modul besteht aus einer eigenen Trägerplatine mit FireBeetle 2 ESP32-E, mehreren Sensoren, E-Ink-Display und Akku in einem 3D-gedruckten Gehäuse. Die Firmware zählt Zyklen per Interrupt, erkennt fünf Werkzeugzustände, Schocks und Kondensationsrisiko, schläft in drei Stufen und stellt alle Daten über eine dokumentierte HTTP-Schnittstelle bereit. Die Materialkosten liegen bei CHF 98.37, unter dem Budget von CHF 300.

Drei Ergebnisse tragen die Arbeit:

Erstens hat die Zählung über 75 Stunden und 21’500 Zyklen keine Abweichung gezeigt; die Grundregel «kein Zyklus geht verloren» ist am Gerät belegt.

Zweitens haben Werkzeugbauer bei Ypsomed das Gerät ohne Anleitung eingerichtet; die Annahme, dass Benutzerfreundlichkeit über den Einsatz entscheidet, hat sich als tragfähig erwiesen, und die Umsetzung erfüllt sie.

Drittens ist das Gerät nachbaubar: Stückliste, Schaltplan, Druckdaten und Firmware sind vollständig und werden veröffentlicht.

15.2 Empfehlung

Die Empfehlung richtet sich an den Werkzeugbau der Ypsomed AG als Ort des Bedientests und an jeden Betrieb mit eigenem Werkzeugpark.

Pilot an drei Werkzeugen über drei Monate. Drei Module an drei Werkzeugen mit unterschiedlichem Lebenslauf: eines in Dauerproduktion, eines mit häufigem Wechsel, eines im Lager mit Transport. Ziel ist nicht die Technik, die ist geprüft, sondern die Frage, ob das Log im Alltag gelesen wird und ob es bei einem Schaden hilft. Aufwand: drei Module zu CHF 98.37 pro Stück, drei Endschalter, ein Nachmittag Einrichtung. Vor dem Piloten sind zwei Dinge zu tun: die Stromaufnahme messen, damit die Akkulaufzeit eine Zahl ist, und die drei Grenzen aus Kapitel 14.2 dem Bedienpersonal nennen.

Nicht empfohlen ist ein Einsatz an Werkzeugen über 45 °C Montagetemperatur ohne Materialwechsel am Gehäuse und ohne Ladeabschaltung, und ein Einsatz in einem offenen Netzwerk, weil die Schnittstelle nicht geschützt ist.

15.3 Ausblick

Die Punkte sind nach Nutzen pro Aufwand geordnet.

Tabelle 48 - Nächste Schritte

Schritt	Was und warum	Aufwand
Werkzeugtemperatur über «E»	Temperaturfühler mit Kontakt zum Stahl (Gravity TMP117, rund CHF 10). Firmware vergleicht T_Stahl mit dem Taupunkt der Luft. Erkennt das kalte Werkzeug in warmer Luft (6.4.2). Zwischenschritt ohne Hardware: Werkzeugtemperatur aus der Temperaturgeschichte schätzen.	Bauteil, zwei Abende Firmware
Schock einheitlich messen	Auch im Wachbetrieb den Hochpass des Sensors nutzen und mit ±8 g messen, Spitzenwert aus dem FIFO. Einstellbereich auf 0.5 bis 8 g erweitern. Beseitigt den Unterschied zwischen wach und schlafend (11.8).	Firmware

Schritt	Was und warum	Aufwand
Konfigurierbare Zeitgrenzen	Unterbruch (60 s), Stillstand (10 min), Transportbeginn (5 s) in die Konfiguration statt in den Code. Nötig für Werkzeuge mit Zykluszeiten über 60 s.	Firmware
CSV-Export und Push (W01, W03)	CSV aus dem Export in der Firmware erzeugen; optional MQTT-Push für Betriebe, die es erlauben.	Firmware
Echtzeituhr mit Pufferbatterie	RTC-Baustein (DS3231) an «E»: Zeit überlebt Stromausfall, Drift unter einer Minute pro Monat. Macht den Standalone-Modus für die Ursachenrekonstruktion belastbar.	Bauteil, Platine V1.1
Platine V1.1	Korrekturen aus Tabelle 18 einarbeiten, Pull-up für Eingang 4, Serienwiderstände an den Aussenanschlüssen, ESD-Schutz.	Layout, Bestellung
Gehäuse für die Werkzeugumgebung	Material ABS oder PETG, Ladeabschaltung über 45 °C, Dichtung an Deckel und Stecköffnungen. Danach Feldversuch über Monate an mehreren Werkzeugen.	neue Version
Messungen nachholen	Stromaufnahme in drei Stufen, Akkuentladung bis Stufe «kritisch», Uhrdrift über 24 h, Eigenerwärmung im Gehäuse. Stellt Kapitel 8.8 von Annahmen auf Messwerte.	ein Wochenende

Veröffentlichung und Lizenz (F12). Hardware-Design (Schaltplan, Layout, CAD, Druckdaten) und Dokumentation werden unter CC BY-NC-SA 4.0 veröffentlicht, die Firmware unter GPL-3.0, weil sie die GPL-lizenzierte Bibliothek GxEPD2 einbindet. Die Nutzung des Geräts im eigenen Betrieb ist damit frei, auch in Unternehmen; der Nachbau für den Eigenbedarf ebenso. Wer das Gerät oder Ableitungen davon gegen Entgelt vertreiben will, braucht eine kommerzielle Lizenz des Verfassers (Kontakt über MouldCondition.com). Für die Firmware bleibt die GPL-Pflicht, Änderungen offenzulegen, in jedem Fall bestehen. Die übrigen Bibliotheken (Adafruit BME280 unter BSD, ArduinoJson und QR Code generator unter MIT) sind mit dieser Wahl verträglich. Das Modell entspricht dem Ziel der Themeneingabe, die Ergebnisse kostenfrei zugänglich zu machen, und sichert zugleich, dass eine kommerzielle Verwertung nicht an dem vorbeigeht, der die Arbeit geleistet hat. Die Lizenz schützt die Dateien, nicht die Idee; wird aus dem Pilot ein Produkt, ist eine IP-Beratung der nächste Schritt.

16 Schlusswort und Danksagung

Vor acht Wochen lag auf meinem Tisch ein FireBeetle, ein Breadboard und eine Idee, die ich aus zehn Jahren Werkzeugbau mitgebracht habe: dass die teuersten Schäden an einem Werkzeug dann entstehen, wenn niemand hinschaut. Heute liegt dort ein Gerät, das hinschaut. Es ist nicht fertig, aber es funktioniert, und es hat in den Händen von Werkzeugbauern bestanden, die es nicht kannten.

Die Arbeit hat mir drei Dinge gezeigt. Dass eine Platine, die man selbst gezeichnet hat, einem die eigenen Fehler mit einem Multimeter vorführt. Dass ein Gerät erst dann fertig ist, wenn jemand anderes es einrichten kann. Und dass die Zusammenarbeit mit einer KI kein Abkürzen ist, sondern ein anderes Arbeiten: schneller im Formulieren, nicht schneller im Verstehen. Das Verstehen bleibt die eigene Arbeit, und es ist der Teil, auf den ich stolz bin.

Mein Dank gilt Marc Bauhofer für die fachliche Begleitung und die ehrlichen Fragen, Fabian Hirter für die Betreuung seitens TEKO, dem Werkzeugbau der Ypsomed AG für den Bedientest, Mohamad Murad für das kritische Gegenlesen, und Celine Hoti für die Geduld in den Wochen, in denen der Küchentisch eine Werkstatt war.

17 Eigenständigkeitserklärung

Ich bestätige, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und alle benutzten Quellen gekennzeichnet habe. Diese Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits einer Prüfungskommission vorgelegt.

Arjen Hoti

Ort / Datum / Unterschrift:



18 Glossar

Dieses Glossar wurde mit Unterstützung von Claude (Anthropic) auf Grundlage der Inhalte dieser Arbeit erstellt. Auswahl, Zusammenstellung und Formulierung der Begriffe und Definitionen erfolgten durch die KI; die fachliche Prüfung und Freigabe erfolgte durch den Verfasser (siehe KI-Journal, Eintrag 13).

Spritzguss und Werkzeugbau

Begriff	Bedeutung
Spritzgiesswerkzeug	Stahlform, in die geschmolzener Kunststoff unter Druck eingespritzt wird. Besteht aus Düsenseite und Auswerferseite.
Kavität	Formgebender Hohlraum im Werkzeug. Ein 16-fach-Werkzeug hat 16 Kavitäten und erzeugt 16 Teile pro Zyklus.
Fachzahl	Anzahl Kavitäten eines Werkzeugs.
Komponenten (1K, 2K)	Anzahl Kunststoffe, die in einem Zyklus verarbeitet werden.
Formtrennung	Ebene, an der sich das Werkzeug öffnet. Der Endschalter an der Formtrennung liefert das Zyklussignal.
Auswerfer	Mechanik, die das fertige Teil aus der Kavität stösst.
Kernzug	Beweglicher Kern im Werkzeug, der vor dem Entformen gezogen wird, etwa für Hinterschneidungen.
Heisskanal	Beheiztes Verteilsystem, das den Kunststoff bis zur Kavität flüssig hält. Empfindlich gegen Schläge und Kaltstart.
Zyklus, Schuss	Einmal Form schliessen, spritzen, kühlen, öffnen, auswerfen. Die Schusszahl ist das Alter eines Werkzeugs.
Zykluszeit	Dauer eines Zyklus, typisch 5 bis 60 s.
Rüsten	Werkzeug auf die Maschine spannen und anschliessen, oder abspannen.
Kaltstart	Betrieb oder Betätigung des Werkzeugs vor dem Erreichen der Betriebstemperatur; häufige Schadensursache.
EQ-Nr	Equipment-Nummer, betriebsinterne Kennung eines Werkzeugs.
Taupunkt	Temperatur, bei der die Luft mit ihrem Feuchtegehalt gesättigt ist. Oberflächen kälter als der Taupunkt beschlagen.
Kondensation	Niederschlag von Wasser auf einer Oberfläche, die kälter als der Taupunkt ist. Ursache von Korrosion an Kavitäten.

Elektronik und Firmware

Begriff	Bedeutung
MCM	Mould Condition Monitoring, Name des Sensor-Moduls dieser Arbeit.
Proof of Concept	Funktionsnachweis: zeigt, dass ein Konzept umsetzbar ist, ohne ein fertiges Produkt zu sein.
Edge-Device	Gerät, das Daten dort verarbeitet und speichert, wo sie entstehen, ohne Cloud oder Server.
ESP32, FireBeetle 2	Mikrocontroller mit WLAN von Espressif; FireBeetle 2 ESP32-E ist das verwendete Board von DFRobot mit Akkuladung.
Firmware	Programm, das auf dem Mikrocontroller läuft.
Interrupt	Hardware-Signal, das den Prozessor sofort unterbricht. Hier für Zyklus und Schock, damit nichts verloren geht.
Light Sleep, Deep Sleep	Schlafstufen des ESP32. Light Sleep: Programm pausiert, Speicher bleibt. Deep Sleep: fast alles aus, Aufwachen ist ein Neustart.
RTC-Speicher	Kleiner Speicherbereich, der den Deep Sleep überlebt.
Ringpuffer	Speicher fester Grösse, bei dem der neueste Eintrag den ältesten überschreibt.
LittleFS	Dateisystem im Flash-Speicher des ESP32.
I2C, SPI	Zwei Bussysteme für Sensoren und Display. I2C: zwei Leitungen, mehrere Teilnehmer. SPI: schneller, mehr Leitungen.

Begriff	Bedeutung
GPIO	General Purpose Input/Output, frei belegbarer Anschluss des Mikrocontrollers.
BME280	Sensor für Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck (Bosch).
LIS2DH	Beschleunigungssensor (ST) mit Hardware-Schwelle und Interrupt-Ausgängen.
E-Ink	Display, das sein Bild ohne Strom behält.
Gravity, JST-PH	Steckersystem von DFRobot mit vorkonfektionierten Kabeln; JST-PH ist der verpolungssichere Stecker.
Dupont	Einfache Steckkabel für Stiftleisten, nicht verpolungssicher.
Breadboard	Steckbrett für Versuchsaufbauten ohne Löten.
PCB, Footprint	Leiterplatte; Footprint ist das Lötbild eines Bauteils auf der Leiterplatte.
FDM, PLA	3D-Druckverfahren mit geschmolzenem Kunststoffdraht; PLA ist das verwendete Material, weich ab rund 60 °C.
Captive Portal	Technik, mit der ein WLAN-Zugangspunkt das Smartphone automatisch auf eine Seite leitet.
Standalone-Modus	Betrieb, bei dem das Modul sein eigenes WLAN aufspannt; kein Firmennetz nötig.
Cockpit	Weboberfläche des Moduls mit Zustand, Messwerten und Zeitachse.
HTTP, JSON, API	Protokoll, Datenformat und Schnittstelle, über die ein Backend die Daten abfragt.
Unix-Zeit	Sekunden seit dem 1. Januar 1970; Format der Zeitstempel im Log.
Hochpass	Filter im Sensor, der die konstante Erdanziehung entfernt und nur Stösse durchlässt.
MVP	Minimum Viable Product, kleinste funktionsfähige Version.

Projektmanagement

Begriff	Bedeutung
Pflichtenheft, F / W	Verbindliche Anforderungsliste. F = Festanforderung (muss), W = Wunschanforderung (soll), gewichtet 1 bis 3.
Muss-Ziel, Kann-Ziel (M, K)	Ziele aus der Themeneingabe an die TEKO.
Paarvergleich, Präferenzmatrix	Methode, um Bewertungsmerkmale paarweise zu vergleichen und daraus Gewichte abzuleiten.
Nutzwertanalyse	Bewertung von Varianten mit gewichteten Punkten.
Design Freeze	Zeitpunkt, ab dem ein Entwurf nicht mehr geändert wird.
DFM	Design for Manufacturing, Prüfung der Fertigbarkeit beim Leiterplattenhersteller.
Kritischer Pfad	Kette von Arbeitspaketen, deren Verzögerung den Endtermin verschiebt.

19 Literaturverzeichnis

AAV Plastics. (o.D.). *Injection Moulding Design Guide*. Abgerufen am 10. 09 2026 von https://www.ewmfg.com/post/components-of-an-injection-mold

Bosch Sensortec. (02 2024). *BME280 - Combined humidity and pressure sensor, Datasheet*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf

DF Robot. (o.D.). *FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.dfrobot.com/product-2195.html?srsltid=AU7gw4W0g3wm3AFG6iqt6FsOhHzzPhsIVr5x8XmJcaLHy95ocWak5uCg

Digital Moulds GmbH, Sierning, Österreich. (o.D.). *Vernetzte Kunststoffproduktion mit Mould Monitoring*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://digitalmoulds.com/

FPE Automation. (o.D.). *Case Study: Vision Inspection for Injection Mold Clearing Pays Off*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://fpeautomation.com/case-study-vision-inspection-for-injection-mold-clearing-pays-off/

Führer, A., & Züger, R.-M. (2024). *Projektmanagement für Führungsfachleute (7. Aufl.).* Zürich, Zürich, Schweiz: Compendio.

HACK Formenbau GmbH, Kirchheim unter Teck, Deutschland. (o.D.). *Moldlife sense*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://hack-formenbau.de/en/moldlife-sense/

Häckel, H. (2016). *Meteorologie.* Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

Holmquist, J., & Eischens, L. (13. 1 2021). *Lessons on Rust Prevention in Molds*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://www.plasticsmachinerymanufacturing.com/molds-tooling/article/21205604/lessons-on-rust-prevention-in-molds

Hoti, A. (2026). *Pflanzenbewässerungssystem mit RTOS.* Teko, Bern.

IWIS AG. (17. 03 2026). *Werkzeugmechaniker (m/w/d)*. Abgerufen am 12. 09 2026 von https://www.jobs.ch/de/stellenangebote/detail/1ed47e1f-0bf2-4756-8100-2041022b7ffa/

J.S.T. Mfg. Co., Ltd. (o.D.). *JST – Japan Solderless Terminals*. Abgerufen am 28. 09 2026 von PH Connector: https://www.jst-mfg.com/product/index.php?series=199&lang=2

JST Sales America Inc. (o.D.). *PH connector*. Abgerufen am 01. 10 2026 von JST Sales America: https://www.jst.com/products/crimp-style-connectors-wire-to-board-type/ph-connector/

Kistler Group. (o.D.). *Process monitoring and control system ComoNeo for injection molding*. Abgerufen am 16. 9 2026 von https://www.kistler.com/INT/en/cp/process-monitoring-and-control-system-comoneo-5887b/P0000382

Kistler. (o.D.). Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.kistler.com/INT/en/cp/online-quality-prediction-system-comoneopredict-2824a/P0001195

Knights, M. (08. 08 2018). *Manner system tracks mold performance*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.plasticsmachinerymanufacturing.com/blow-molding/article/13003446/manner-system-tracks-mold-performance

makeroo.de. (o.D.). *ESP32 Deep Sleep Tutorial: Stromverbrauch senken & monatelang mit Akku laufen*. Abgerufen am 02. 10 2026 von https://makeroo.de/blogs/projekte/esp32-deep-sleep-tutorial-stromverbrauch-senken-monatelang-mit-akku-laufen?srsltid=AU7gw4XSxJLv3HiNp35cZH0jfZsH2hH_Z5T43T7YlgEWr5th5JpKRZGo

mechanizationshop-123. (26. 04 2026). *6157CAUMRKF2,0 KISTLER Pressure sensor brand new Shipping DHL or FedEX*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.ebay.com/itm/374910619006

Mitsubishi Materials Corp. (12. 03 1998). *US Patent 6,129,541: Valve Gate Device for an Injection Mold*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://patents.google.com/patent/US6129541

MoldMaking Technology. (12. 07 2010). *It Pays to Take a Close Look at Your Hot Runner Warranty*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://www.moldmakingtechnology.com/articles/it-pays-to-take-a-close-look-at-your-hot-runner-warranty

Nehls, G. (26. 09 2022). *Mold Monitoring System Provides Real-Time Mold Performance Monitoring*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.moldmakingtechnology.com/products/mold-monitoring-system-provides-real-time-mold-performance-monitoring-

Otto Männer GmbH, Bahlingen, Deutschland. (o.D.). *moldMIND II*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://pdf.directindustry.de/pdf/otto-maenner-gmbh/moldmind-ii/20485-930311.html

purecrea GmbH. (o.D.). *Bastelgarage.ch*. Abgerufen am 16. 09 2026 von https://www.bastelgarage.ch/

Selmax Corporation. (o.B.). *Tool Making*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://www.selmax.com/blog/mold-transfers/

Sonceboz Automotive S.A. (14. 10 2025). *Werkzeugmacher für Kunststoffspritzguss m/w*. Abgerufen am 12. 09 2026 von https://www.jobs.ch/de/stellenangebote/detail/9448cdcd-8390-448b-84e3-d0b35c09bf23/

SpotSee. (o.D.). *ShockWatch 2 Impact Indicator*. Abgerufen am 11. 09 2026 von https://shop.spotsee.io/ShockWatch-2-Indicator-Ring-Label-25G

TE Connectivity. (o.D.). *TE Connectivity Stecker, M8, Buchse, 4-polig, 5A*. Abgerufen am 01. 10 2026 von https://www.traceparts.com/de/product/rs-group-te-connectivity-stecker-m8-buchse-4polig-5a?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP09002002001004&Product=10-15062010-162989

Tyrkin, V. (01. 06 2019). *Dupont Cable Connector 2.54 mm pitch.* Abgerufen am 01. 10 2026 von https://grabcad.com/library/dupont-cable-connector-2-54-mm-pitch-1

Woertz AG. (11. 09 2026). *Werkzeugmacher (100%, m/w)*. Abgerufen am 12. 09 2026 von https://www.jobs.ch/de/stellenangebote/detail/f7892718-6a6e-4236-86bf-92861f487367/

20 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Basis-Phasenkonzept (Quelle: Führer & Züger, 2024, S. 23) 10
Abbildung 2 - Stacey Matrix (Quelle: Führer & Züger, 2024, S. 30, schwarzweiss angepasst) 11
Abbildung 3 - Risikoportfolio (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 189) 14
Abbildung 4 - Projektstrukturplan (Quelle: Eigene Darstellung) 15
Abbildung 5 - Kritischer Pfad, eigene Visualisierung (Quelle: Eigene Darstellung) 21
Abbildung 6 - Aufbau eines einfachen Spritzgusswerkzeugs (Quelle: AAV Plastics, o.D.) 22
Abbildung 7 - Beispiel eines komplexen Medizinaltechnik-Werkzeugs (Quelle: Eigene Darstellung) 23
Abbildung 8 - Aufteilung eines Werkzeuges (Quelle: Eigene Darstellung) 23
Abbildung 9 - Spritzgusswerkzeug auf Spritzgussmaschine (Quelle: Eigene Darstellung) 25
Abbildung 10 - Türe der Spritzgussmaschine entfernt (Quelle: Eigene Darstellung) 25
Abbildung 11 - Spritzgusswerkzeug mit Kernzugeinheit (Hydraulisch) (Quelle: Eigene Darstellung) 26
Abbildung 12 - Spritzgusswerkzeug Plunger Rod 32-fach auf einer Engel e-motion 310/160 T Spritzgussmaschine (Quelle: Eigene Fotos) 26
Abbildung 13 - Visualisierung des schematischen Spritzgusszyklus (Quelle: Eigene Darstellung) 27
Abbildung 14 - Schematischer Spritzgiesszyklus für das 32-fach-Werkzeug Plunger Rod (POM, Massetemperatur 200 °C, Umschaltdruck 1800 bar, Zykluszeit 10,5 s). Darstellung generiert mit Claude (Anthropic), Phasenaufteilung und Druckprofil als repräsentative Annahmen des Verfassers, nicht als Maschinen-Istwerte. 28
Abbildung 15 - Beispiel eines Spritzgusswerkzeuges mit C-Haken Hebevorrichtung (Quelle: Eigene Darstellung) 29
Abbildung 16 - Beispiel eines Spritzgusswerkzeuges welches für den Transport vorbereitet wurde (Quelle: Selmax Corporation, o.D.) 30
Abbildung 17 - Beispiel eines Hochregallagers eines Medizintechnik Betriebes (Quelle: Eigenes Foto) 31
Abbildung 18 - Beispiel eines Werkzeuges welches innerhalb des Werkes auf einer Kunststoffpalette transportiert wird (Quelle: Eigenes Foto) 31
Abbildung 19 - Kistler ComoNeo (Quelle Kistler Group, o.D.) 36
Abbildung 20 - Moldlife sense Bedieneinheit (Quelle (HACK Formenbau GmbH, o.D.) 36
Abbildung 21 - moldMind II (Quelle: Otto Männer GmbH o.D.) 37
Abbildung 22 - Mould Monitoring (Quelle: Digital Moulds o.D.) 37
Abbildung 23 - Präferenzmatrix (eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 73) 43
Abbildung 24 - Blockdiagramm Systemarchitektur (Quelle: Eigene Darstellung) 46
Abbildung 25 - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller (Quelle DFRobot, o.D.) 48
Abbildung 26 - Gravity BME280 (Quelle: Bastelgarage.ch o.D.) 52
Abbildung 27 - Gravity AHT20 (Quelle: Bastelgarage.ch o.D. 52
Abbildung 28 - Gravity LIS2DH (Quelle: Bastelgarage.ch o.D.) 56
Abbildung 29 - Fermion ADXL345 (Quelle: Bastelgarage.ch o.D. 56
Abbildung 30 - Komponententest am Breadboard 59
Abbildung 31 - Induktiver Sensor - E 6560 (Quelle: Meusburger, o.D.) 60
Abbildung 32 - Endschalter E6512 (Quelle Meusburger o.D.) 61
Abbildung 33 - Gravity mechanischer Endschalter (Quelle: Bastelgarage o.D.) 61
Abbildung 34 - JST Stecker CAD Screenshot (J.S.T. Mfg. Co., Ltd., o.D.) 64
Abbildung 35 - Dupont Cable Connector (Tyrkin, 2019) 64
Abbildung 36 - M8 Rundstecker CAD Screenshot (TE Connectivity, o.D.) 64
Abbildung 37 - CAD Screenshot der PCB Baugruppe mit Vermerken (Quelle: Selbstgemachtes Bild) 65
Abbildung 38 - CAD-Screenshot JST Kabel (Quelle: Selbstgemachtes Bild) 66
Abbildung 39 - CAD-Screenshot JST Verbindung (Quelle: Selbstgemachtes Bild) 67
Abbildung 40 - Speicherebenen des Sensor-Moduls (Quelle: Selbst erstellt) 70
Abbildung 41 - FireBeetle 2 ESP32-E IoT Microcontroller (DF Robot, o.D.) 71
Abbildung 42 - 3300 mAh Akku mit Schutzelektronik und JST Stecker (purecrea GmbH, o.D.) 73
Abbildung 43 - Seiten der Weboberfläche und ihre Verknüpfung (Quelle: Selbst erstellt) 76
Abbildung 44 - Seiten der Weboberfläche auf dem Smartphone, mit Beispieldaten (Quelle: Selbst erstellt) 76
Abbildung 45 - Bildschirme des E-Ink-Displays, nach dem Quellcode gezeichnet (Quelle: Selbst erstellt) 77
Abbildung 46 - Schaltplan der Trägerplatine, Version 1.0, Stand vor den zwei Korrekturen (Quelle: Selbst erstellt) 78
Abbildung 47 - Bestückte Trägerplatine, in die Basis eingebaut (Quelle: Selbst erstellt) 80
Abbildung 48 - Handskizze des Gehäusekonzepts (Quelle: Selbst erstellt) 81
Abbildung 49 - CAD-Entwurf zum frühen Projektstand (Quelle: Selbst erstellt) 81

Abbildung 50 - Zwischenschritte in der CAD Entwicklung (Quelle: Selbst erstellt) 82
Abbildung 51 - PCB vom 3D zu 2D (Quelle: Selbst erstellt) 82
Abbildung 52 - Fertiger PCB zurück im 3D-CAD 83
Abbildung 53 - Gehäuse im CAD und als gedruckter Prototyp (Quelle: Selbst erstellt) 83
Abbildung 54 - Explosionsansicht des Sensor-Moduls (Quelle: Selbst erstellt) 84
Abbildung 55 - Basis des Gehäuses: Aufnahmen und eingesetzte Bauteile (Quelle: Selbst erstellt) 85
Abbildung 56 - Passprobe an der Version V0: Module in der Basis, vor der Bestellung der Platine (Quelle: Selbst erstellt) 86
Abbildung 57 - Details der Basis: Kompensationsnasen, Kreuzstütze, Klemmbügel (Quelle: Selbst erstellt) 86
Abbildung 58 - Deckel von innen (Quelle: Selbst erstellt) 87
Abbildung 59 - Unterseite des Moduls (Quelle: Selbst erstellt) 87
Abbildung 60 - Gehäuseorientierung auf 3D-Druckbett (Quelle: Selbst erstellt) 88
Abbildung 61 - Version V0 in Schwarz: Deckel von innen und Basis mit bestückter Platine (Quelle: Selbst erstellt) 89
Abbildung 62 - Schichtung der Firmware: Einbinde-Reihenfolge als Abhängigkeitsregel (Quelle: Selbst erstellt) 94
Abbildung 63 - Nachrichtenwege zwischen Interrupts, Web-Handlern, Pinnwand und Dirigent (Quelle: Selbst erstellt) 95
Abbildung 64 - Ablauf von setup(): Einschalten links, Aufwachen aus dem Deep Sleep rechts (Quelle: Selbst erstellt) 96
Abbildung 65 - Aufwach-Entscheidung: weiterschlafen oder wach bleiben (Quelle: Selbst erstellt) 97
Abbildung 66 - Die fünf Gruppen eines Schleifendurchlaufs (Quelle: Selbst erstellt) 97
Abbildung 67 - Zykluszählung vom Endschalter bis zum Display (Quelle: Selbst erstellt) 99
Abbildung 68 - Schockerkennung im Wachbetrieb und im Deep Sleep (Quelle: Selbst erstellt) 101
Abbildung 69 - Zustandsautomat der Firmware mit Übergängen T1 bis T13 (Quelle: Selbst erstellt) 103
Abbildung 70 - Drei Wachheitsstufen und ihre Übergänge (Quelle: Selbst erstellt) 104
Abbildung 71 - Wahl des Messintervalls vor jedem Deep Sleep (Quelle: Selbst erstellt) 106
Abbildung 72 - Speicherorte und Sicherungszeitpunkte (Quelle: Selbst erstellt) 106
Abbildung 73 - Testaufbau Dauerlauf mit Maschinensimulator (Quelle: Eigenes Foto) 111
Abbildung 74 - Cockpit nach Abschluss des 75-h-Dauerlaufs (Quelle: Eigener Screenshot 111
Abbildung 75 - Versuchsanordnung Falltest (Quelle: Eigene Darstellung) 112
Abbildung 76 - Screenshot aus /cockpit vom MCM (Quelle: Selbst erstellt) 113
Abbildung 77 - Modul mit Magneten am Spritzgusswerkzeug montiert (Quelle: Selbst gemachtes Bild) 114
Abbildung 78 - Modul in der Produktion, dazwioschen eine Wärmeschutzplatte (Quelle: Selbst gemachtes Bild) 114

21 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Risiko Management Formular (eigene Darstellung in Anlehnung an Führer & Züger, 2024, S. 191) .. 12
Tabelle 2 - Gegenüberstellung der untersuchten Systeme mit dem Zielsystem 38
Tabelle 3 - Kompetenzmatrix (Quelle siehe Anhang "Auswertung von Stelleninseraten" 40
Tabelle 4 - Anforderungsabgleich für Hardwareplattform 48
Tabelle 5 - Messgrössen und deren Einfluss auf das Gesamtsystem 51
Tabelle 6 - Steckersystemtypen und Eigenschaften 64
Tabelle 7 - Netzwerkmodi des Sensor-Moduls 68
Tabelle 8 - Ereignistypen 69
Tabelle 9 - Aufbau eines Eintrags 69
Tabelle 10 - Annahmen und Ergebnis der Kapazitätsberechnung 70
Tabelle 11 - Wachheitsstufen im Akkubetrieb und berechnete Laufzeit 72
Tabelle 12 - Ausgangswerte der Laufzeitberechnung 72
Tabelle 13 - Bediengrundsätze und ihre Umsetzung 74
Tabelle 14 - Ablauf der Inbetriebnahme 74
Tabelle 15 - Konfigurationsparameter des Sensor-Moduls 75
Tabelle 16 - Akustische Rückmeldungen 76
Tabelle 17 - Pinbelegung des FireBeetle im Sensor-Modul 79
Tabelle 18 - Fehler der Platine Version 1.0 und ihre Korrektur 80
Tabelle 19 - Konstruktionsprinzipien des Gehäuses 83
Tabelle 20 - Aufnahmen in der Basis, Nummern gemäss Abbildung 47 a 85
Tabelle 21 - Schnittstellen des Gehäuses nach aussen 88
Tabelle 22 - Zusammenbau des Sensor-Moduls 90
Tabelle 23 - Stückliste für ein Sensor-Modul 90
Tabelle 24 - Grundregeln der Firmware 92
Tabelle 25 - Dateien der Firmware 93
Tabelle 26 - Entscheidungen zum Aufbau und ihre Begründung 94
Tabelle 27 - Die wichtigsten gemeinsamen Variablen in mcmConfig.h 95
Tabelle 28 - Die 21 Schritte der Hauptschleife 97
Tabelle 29 - Feste Zeitgrenzen der Firmware 98
Tabelle 30 - Eigenschaften der Zykluszählung 99
Tabelle 31 - Vier Arten der Bewegungsprüfung 100
Tabelle 32 - Schockerkennung im Vergleich 101
Tabelle 33 - Eingangssignale des Zustandsautomaten 102
Tabelle 34 - Übergangstabelle des Zustandsautomaten 103
Tabelle 35 - Verhalten je Zustand im Akkubetrieb 104
Tabelle 36 - Übergänge zwischen den Wachheitsstufen 105
Tabelle 37 - Weckquellen je Schlafart 105
Tabelle 38 - Was überlebt was 106
Tabelle 39 - Aufbau eines Eintrags im Ringpuffer 107
Tabelle 40 - Adressen der Datenausgabe 107
Tabelle 41 - Felder der Ereignisse 108
Tabelle 42 - Grenzen der Firmware und ihre Folgen 108
Tabelle 43 - Übersicht der durchgeführten Tests 110
Tabelle 44 - Ergebnis des 75-h-Dauerlaufs 112
Tabelle 45 - Pflichtenheftprüfung, Festanforderungen 115
Tabelle 46 - Pflichtenheftprüfung, Wunschanforderungen 116
Tabelle 47 - Meilensteine Soll und Ist 117
Tabelle 48 - Nächste Schritte 121

22 Hilfsmittel und Tools

Tool	Zweck
OnShape	3D-CAD für Gerätedesign
EasyEDA Pro	Schaltplan- und PCB-Design
Arduino IDE 2.3.10	Firmware-Entwicklung und Upload
Claude (Anthropic)	KI-Assistent, https://claude.ai, Modelle: Opus 4.6 und Fable 5.1. Verwendung: Erstellung von Texten, Tabellen, Abbildungen und Firmware-Code. Zugriffszeitraum: September-Oktober 2026.
PowerPoint	Erstellung von Grafiken und Diagrammen sowie Bildbeschriftung
Draw.io 31.7.0	Erstellung der Ablaufdiagramme
Mermaid	Erstellung von Diagrammen
Excel	Erstellung der Planung sowie Erstellung von Stückliste
Word	Erstellung der dokumentation
Notion	Erstellung der Notizen und WeeklyUpdate
Creality Slicer	Erstellung der Druckdaten aus 3D-STL
Fichero Print	Erstellung der Etiketten

23 Anhang

Die folgenden Anhänge werden digital im Ordner «Anhang» eingereicht:

A - Themeneingabe
B - Schnittstellenspezifikation
C - Schaltplan und PCB-Layout
D - Firmware-Quellcode
E - Terminplan Soll/Ist
F - Auswertung Stelleninserate (PDF-Archiv und Kompetenzmatrix)
G - KI-Journal
H - Testprotokolle und Logdaten
I – CAD Daten
J – Technisches Datenblatt
K – Weekly Update